

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra telekomunikační techniky**

**Aplikace programového prostředí Optiwave  
OptiBPM v oblasti návrhu optických vazebních  
článků**

**Software Optiwave OptiBPM in design  
of optical couplers**

**2011**

**Jan Dořičák**

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Jan Dořičák**

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Aplikace programového prostředí Optiwave OptiBPM v oblasti návrhu  
optických vazebních článků  
Software Optiwave OptiBPM in design of optical couplers

Zásady pro vypracování:

1. Popište současné postupy při návrhu a výrobě optických vazebních členů (OVČ).
2. Proměřte parametry dostupných jednovíkových OVČ.
3. S využitím programového prostředí Optiwave OptiBPM navrhnete jednovíkový OVČ 1x02-50.
4. Parametry navržených jednovíkových OVČ proměřte v programovém prostředí Optiwave OptiSystem.
5. Popište výhody a možné problémy při implementaci programového prostředí Optiwave OptiBPM do výroby.

Seznam doporučené odborné literatury:

LAM, Cedric F. *Passive Optical Networks: Principles and practice*. Oxford: Elsevier Inc., 2007. 368 s. ISBN 978-0-12-373853-0.

ZINTH, Wolfgang; ZINTH, Ursula. *Optik: Lichtstrahle - Wellen - Photonen*. 2. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2009. 335 s. ISBN 978-3-486-58801-9.


*OptiBPM: Technical Background and Tutorials*. Ottawa, Ontario: Optiwave, 2007. 500 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Koudelka**

Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 06.05.2011

  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.  
vedoucí katedry



  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 5. května 2011

.....

Podpis

## **Poděkování:**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Koudelkovi, prof. Vladimíru Vašínkovi a členům katedry telekomunikační techniky za pomoc a odborné vedení při řešení vzniklých problémů, které podstatnou měrou přispěly ke zkvalitnění této diplomové práce.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá nejrozšířenějšími postupy výroby OVČ a měřením parametrů OVČ. Dále se také zabývá návrhem OVČ a jeho simulací s využitím návrhového softwaru OptiBPM společnosti Optiwave a dalším otestováním navrženého OVČ v aplikaci OptiSystem rovněž od společnosti Optiwave. Tato práce je rozdělena do následujících oddílů. První kapitola se zabývá dvěma základními technologiemi výroby OVČ a jejich popisem. Následuje kapitola věnovaná měření OVČ. Dále pak kapitola popisující návrh OVČ v prostředí aplikace Optiwave OptiBPM. Na závěr je zvážena možnost nasazení Optiwave OptiBPM ve výrobě a možné výhody a problémy s implementací tohoto softwaru do výroby.

## **Klíčová slova:**

Coupler, OptiBPM, Optiwave, optické vazební články, měření OVČ, FBT, PLC

## **Abstract**

This diploma thesis deals with the most widely used procedures production of optocouplers and measurement parameters of optocouplers. Further its deals with design of optocoupler and its simulation using the OptiBPM design software from Optiwave Company and further testing of designed optocoupler in application OptiSystem also from Optiwave Company. This work is divided to following chapters. The first chapter discusses and describes two basic manufacturing technologies of optocouplers. The following chapter is devoted to measurement of optocouplers. Next chapter is describing the designing of optocoupler in application Optiwave OptiBPM. At the end of this thesis is considering the possibility to deploy Optiwave OptiBPM in serial production and possible advantages and disadvantages with implementing this software in production.

## **Key Words:**

Coupler, OptiBPM, Optiwave, Optocoupler, measuring of optocouplers, FBT, PLC

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ADI	Alternating direction implicit
ABC	Absorbing boundary condition
BER	Bit error ratio
BPM	Beam propagation method
CAD	Computer-aided design
DLL	Dynamic – link library
FBT	Fused biconic taper
FD-BPM	Finite difference beam propagation method
FDTD	Finite difference time domain
FHD	Flame hydrolysis deposition
HD	High definition
IP TV	Internet protocol television
OVČ	Optický vazební článek
PDL	Polarization dependent loss
PLC	Planar lightwave circuit
PML	Perfectly matched layer
PON	Passive optical network
RAM	Random-access memory
RID	Refractive Index Distribution
RIE	Reactive ion etching
SM	Single mode
SVEA	Slowly varying envelope approximation
TBC	Transparent boundary condition
TDT	Thermal diffusion technology
VoD	Video on demand
WDM	Wavelength-division multiplexing

# OBSAH

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. SOUČASNÉ POSTUPY PŘI NÁVRHU A VÝROBĚ OVČ .....</b>	<b>3</b>
2.1 Matematický princip funkce OVČ.....	3
2.1.1 Závislost na konstantě šíření.....	4
2.1.2 Koeficient vazby .....	6
2.2 Technologie FBT.....	7
2.3 Technologie PLC.....	9
<b>3. NAMĚŘENÉ PARAMETRY DOSTUPNÝCH JEDNOVIDOVÝCH OVČ .....</b>	<b>11</b>
3.1 Měření jednovidových optických vazebních členů .....	11
3.1.1 Měřené veličiny .....	12
3.1.2 Postup měření .....	15
3.2 Měření OVČ 01x02 90/10.....	17
3.3 Měření OVČ 01x02 70/30.....	18
3.4 Měření OVČ 01x02 50/50.....	20
3.5 Měření WDM OVČ 01x02 1310/1550nm .....	21
<b>4. NÁVRH OVČ V PROSTŘEDÍ OPTIWAVE OPTIBPM .....</b>	<b>23</b>
4.1 Popis prostředí OptiBPM.....	23
4.2 Matematické řešení simulace .....	24
4.2.1 Konečné řešení rovnic.....	25
4.2.2 Hraniční podmínky výpočetního okna .....	26
4.3 Tvorba optického vazebního členu v prostředí OptiBPM.....	26
4.3.1 OptiBPM Profile designer .....	27
4.3.2 OptiBPM Layout designer.....	29
4.3.3 Vlnovody v Layout designeru .....	31
4.3.4 Vložení zdroje signálu.....	35

4.3.5	Další možnosti Layout designeru.....	37
4.4	Simulace v prostředí OptiBPM .....	38
4.4.1	OptiBPM Analyzer .....	39
4.5	Tvorba skriptů pro simulaci .....	39
4.5.1	Základní konstrukce jazyka .....	40
4.5.2	Základní prvky pro práci s objekty .....	41
4.6	Vytvoření komponenty pro prostředí OptiSystem.....	42
4.7	Návrh OVC 01x02 50/50 FBT .....	42
4.7.1	Parametry návrhu .....	43
4.7.2	Simulace vzdalování os vláken a změny poloměru jádra vláken.....	44
4.7.3	Simulace prodlužování vazební oblasti.....	48
4.7.4	Simulace změny vlnové délky .....	49
4.8	Návrh OVC 01x02 50/50 PLC .....	50
4.9	Měření navržené komponenty .....	53
<b>5.</b>	<b>VÝHODY A MOŽNÉ PROBLÉMY IMPLEMENTACE.....</b>	<b>58</b>
5.1	Výhody simulačního softwaru.....	58
5.2	Nevýhody simulačního softwaru .....	58
<b>6.</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>60</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>62</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>64</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>66</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>67</b>



# 1. ÚVOD

Během několika posledních let je s nástupem nových technologií kladen stále větší důraz na přenosovou rychlost datových sítí. Nové technologie, jako jsou IP TV ve vysokém HD rozlišení či VoD (Video on Demand) s rostoucí kvalitou obrazu a zvuku, vyžadují přenášet stále větší objemy dat. Rapidně roste také počet uživatelů vyžadujících kvalitní a rychlé připojení do sítě internet z důvodu využití výše zmíněných služeb. Dále také s postupným rozšiřováním podnikových privátních sítí narůstá objem dat přenášovaných mezi jednotlivými sítěmi po páteřní síti. Zvyšují se i požadavky operátorů na počet hovorových kanálů přenášovaných po jedné trase se zachováním stávajících kvalitativních parametrů případně i jejich zlepšení.

Z těchto důvodů se v posledních letech začaly nahrazovat metalické sítě, které svými maximálními dosažitelnými přenosovými rychlostmi přestaly dostávat rostoucím požadavkům jednotlivých uživatelů datových či telekomunikačních služeb, sítěmi optickými. S postupným rozvojem technologií optických sítí roste i maximální dosažitelná rychlost a překlenutelná vzdálenost bez regenerace signálu ve vlákne. Dnešní optická vlákna jsou schopna teoreticky přenášet data s přenosovou rychlostí až 50 Tbit/s s využitím WDM (Wavelength Division Multiplex) technologie. Co se překlenutelných vzdáleností týče, jsou optická vlákna s využitím metod kompenzace disperze schopny překlenout vzdálenosti několika tisíc kilometrů bez regenerace. Těmto vlastnostem optických sítí nejsou metalické sítě schopny nijak konkurovat. Další výhodou optických sítí zvyšující bezpečnost je galvanické oddělení, díky němuž se eliminuje riziko škod při přepětí či úderu blesku. Nezanedbatelnou výhodou je také necitlivost signálu v optickém vlákne na rušení, které se vyskytuje v blízkosti zdrojů elektromagnetického pole.

Pro realizaci optických sítí se uplatňují kromě jednovíkových vláken, zdrojů a detektorů, také optické vazební členy (OVČ). Díky OVČ jsme schopni větvit či slučovat síť, aniž bychom museli optický signál převádět na elektrický a následně zpět na optický. OVČ tedy pracují v reálném čase a netvoří žádné omezení přenosové rychlosti a použitého protokolu. Výhodou jsou také menší rozměry a nízká cena. Nejpoužívanějšími OVČ při návrhu optických sítí se staly couplery a splittery (vláknové odbočnice), což jsou pasivní optické prvky sloužící k sloučení resp. rozdělení optického výkonu. Jedná se tedy o klíčové komponenty optických sítí. Typické je použití prvků s jedním vstupem a dvěma výstupy, přičemž se optický výkon obvykle rozdělí rovnoměrně na oba výstupy. Vyskytují se také prvky s dělicím poměrem 7:3 a 9:1, někteří výrobci nabízejí také prvky s dělicím poměrem 99:1, přičemž výstup s 1% vstupního výkonu je používán pro měřicí účely a monitoring. Výhoda tohoto řešení spočívá v tom, že v případě měření není nutné trasu rozpojovat a je možné měřit

za provozu. Rozlehlejší sítě využívají OVČ schopné rozdělit vstupní signál až do 128 výstupů. Dále jsou na trhu i OVČ umožňující oddělovat od sebe jednotlivé WDM kanály. Příkladem může být OVČ, na jehož vstupu jsou signály o vlnové délce 1550 nm a 1310 nm, který tyto signály rozděluje do dvou výstupů, kde každému výstupu je přiřazena jedna vlnová délka. OVČ tedy mají své nezastupitelné místo v konstrukci optických sítí, především pak v pasivních optických sítích PON.

Pro návrhy optických tras se v posledních letech stále více používají různé aplikace umožňující z předpřipravených virtuálních komponent s možností různého nastavení sestavit zamýšlenou síť a provést na ní různá měření před vlastní realizací sítě (měření chybovosti, disperze, překlenutelné vzdálenosti při dodržení stanovené hodnoty BER). Softwarový návrh trasy přináší tedy mnoho výhod. Také se stále více prosazuje nejen softwarový návrh optických tras, ale i softwarový návrh OVČ, který umožňuje navrhovat snadno a rychle prvky optické sítě podle zadaných parametrů splňujících požadovaná kritéria. Samozřejmostí je i možnost simulace jednotlivých návrhů a možnost okamžitého vyhodnocení jeho správnosti, což by bez použití softwarových prostředků v případě složitějších návrhů bylo velmi obtížné. Velkou výhodou je také možnost exportu vytvořeného návrhu jako komponenty do softwaru pro návrh optické trasy. Pak je možno následnou simulací vyhodnotit, jaký má daná komponenta vliv na celou optickou síť. Jedním z takových softwarových aplikací je i Optiwave OptiBPM.

Tato diplomová práce popisuje základní parametry OVČ a způsoby jejich měření. Dále se také zaměřuje na technologii výroby těchto optoelektronických součástek. V této práci je popsána tvorba OVČ právě v návrhovém a simulačním softwaru Optiwave OptiBPM a následný export vytvořeného OVČ do aplikace OptiSystem určeném pro návrh optických tras. Cílem práce je navrhnout jednovidový OVČ 01x02 s dělicím poměrem 1:1 s využitím programového prostředí Optiwave OptiBPM a proměřit jeho parametry Optiwave OptiSystem. Dalším cílem této práce je popsat výhody a možné problémy při implementaci programového prostředí Optiwave OptiBPM do výroby pro usnadnění budoucího použití tohoto programu.

## 2. SOUČASNÉ POSTUPY PŘI NÁVRHU A VÝROBĚ OVČ

V současné době existují dva základní přístupy při výrobě OVČ. Tyto dva přístupy se větví do několika technologií, které se od sebe více či méně odlišují. Starší ze dvou základních přístupů je založen na principu překrývání módových polí použitých optických vláken. Pro tento přístup výroby je nejznámější technologie FBT. Druhý přístup pracuje na principu technologie planárních vlnovodů, také známé jako technologie integrované optiky. Tato technologie je při výrobě OVČ známá pod zkratkou PLC. Výhodou technologie planárních vlnovodů je, že má menší hodnoty zbytkového útlumu.

### 2.1 Matematický princip funkce OVČ

Mějme dvě různá optická vlákna s rozdílnou konstantou šíření  $\beta_1$  a  $\beta_2$ . Na začátek prvního vlákna přivedeme optický výkon  $P_1(0)$  tedy v místě kde osa šíření  $z = 0$ . Pro hodnotu výkonu v prvním vlákně  $P_1(z)$  a hodnotu výkonu ve druhém vlákně  $P_2(z)$  platí rovnice (1) a (2):

$$\frac{P_1(z)}{P_1(0)} = 1 - \frac{\kappa^2}{\gamma^2} \sin^2(\gamma z), \quad (1)$$

$$\frac{P_2(z)}{P_1(0)} = \frac{\kappa^2}{\gamma^2} \sin^2(\gamma z), \quad (2)$$

$$\gamma^2 = \kappa^2 + \frac{1}{4}(\Delta\beta)^2, \quad (3)$$

$$\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2, \quad (4)$$

$$\beta = n \frac{\omega}{c}, \quad (5)$$

kde  $\kappa$  je koeficient vazby a určuje intenzitu interakce mezi vlákny. Hodnota koeficientu vazby závisí na parametrech vlákna, vzdálenosti os jader vláken a na vlnové délce.  $\Delta\beta$  určuje fázový rozdíl mezi vlákny. Proměnná  $z$  určuje pozici v oblasti, kde dochází k interakci módových polí vláken a tedy přenosu výkonu z jednoho vlákna do druhého a zpět, tzv. vazební oblast.

Z rovnic (1) a (2) vyplývá tato rovnice:

$$P_1(z) + P_2(z) = P_1(0). \quad (6)$$

Výsledná rovnice (6) odpovídá zákonu zachování energie.

Jsou-li vlákna od sebe velmi vzdálená v porovnání s průměrem módového pole, nedochází k interakci mezi dvěma vlákny a koeficient vazby  $\kappa = 0$ . Pak z rovnic (1) a (2) vyplývá, že

$$P_1(z) = P_1(0), \quad (7)$$

$$P_2(z) = 0. \quad (8)$$

Nedochází tedy k žádnému přenosu výkonu do druhého vlákna [1].

#### 2.1.1 Závislost na konstantě šíření

V případě, kdy jsou obě vlákna shodná, platí že  $\beta_1 = \beta_2$ , pak

$$\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2 = 0. \quad (9)$$

Pak se rovnice (3) změní takto:

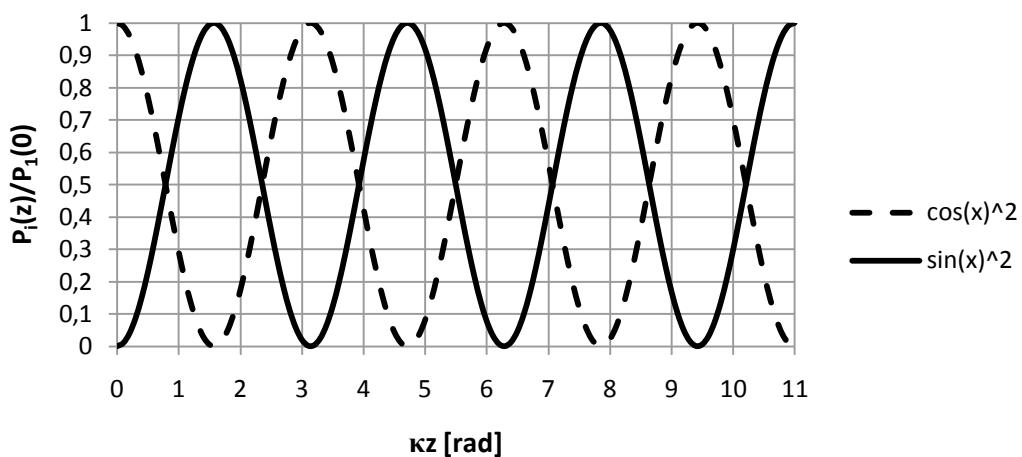
$$\gamma^2 = \kappa^2 + \frac{1}{4}(0)^2 = \kappa^2. \quad (10)$$

Pro výkony v těchto shodných vláknech pak platí tyto vztahy:

$$\frac{P_1(z)}{P_1(0)} = 1 - \sin^2(\kappa z) = \cos^2(\kappa z), \quad (11)$$

$$\frac{P_2(z)}{P_1(0)} = \sin^2(\kappa z). \quad (12)$$

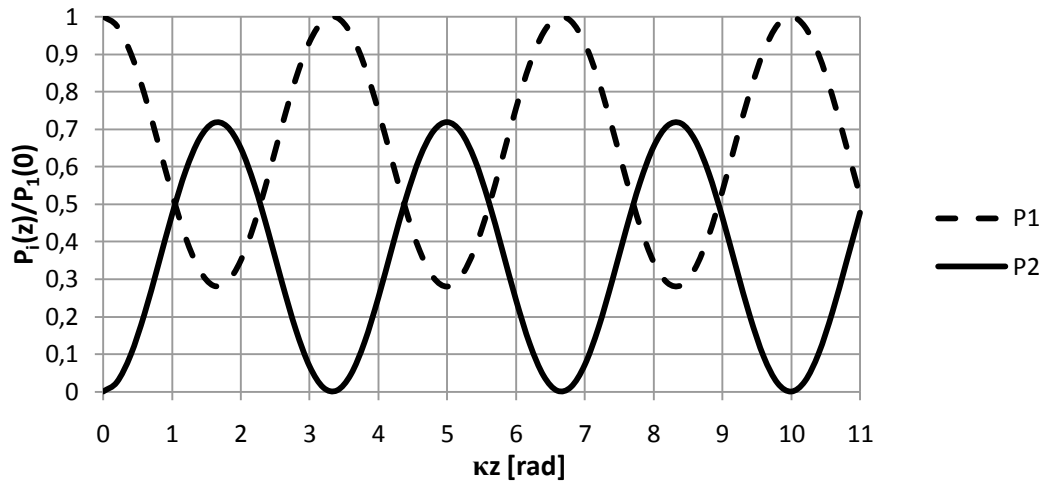
Uvedené goniometrické funkce jsou periodické s periodou  $2\pi$ . Jejich výsledné průběhy jsou znázorněny na obr 1. Zobrazeným průběhům funkcí  $\sin^2(x)$  a  $\cos^2(x)$  za předpokladu jednotkového vstupního výkonu odpovídají funkce výkonů  $P_1(z)$  a  $P_2(z)$  z rovnic (11), (12).



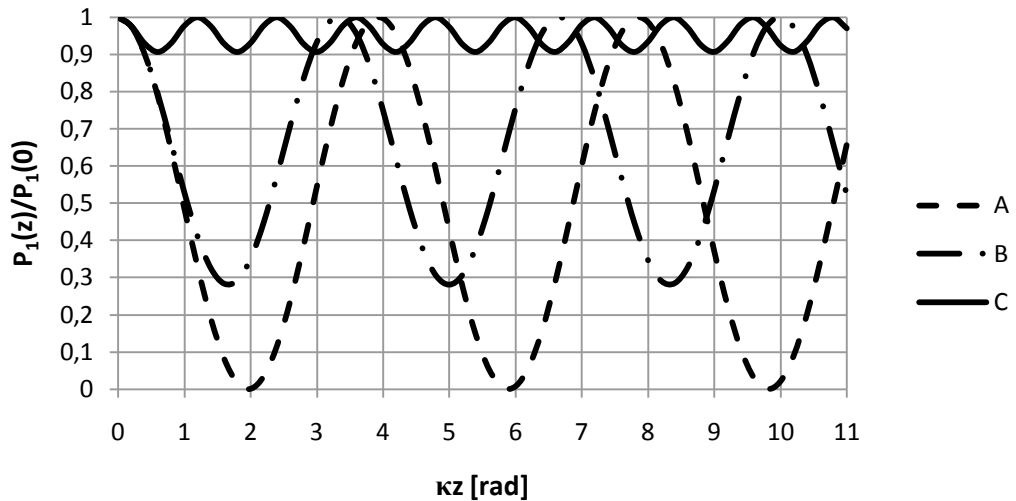
Obr. 1: Grafy průběhů funkcí  $\sin^2(x)$  a  $\cos^2(x)$ .

V případě rovnic (1) a (2) je průběh výkonu  $P_1(z)$  omezen zdola a průběh výkonu  $P_2(z)$  omezen shora, což je zobrazeno na obr. 2. To je způsobeno rozdílnou konstantou šíření ( $\beta_1 \neq \beta_2$ ).

Obr. 3 zobrazuje průběhy výkonu  $P_1(z)$  při změně rozdílu konstanty šíření  $\Delta\beta$ . Pro případ A je  $\Delta\beta = 0 \text{ mm}^{-1}$  a průběh je tedy shodný s průběhem výkonu  $P_1(z)$  v obr. 1. Pro případ B je  $\Delta\beta = 1 \text{ mm}^{-1}$  a pro případ C je  $\Delta\beta = 5 \text{ mm}^{-1}$ . S růstem hodnoty  $\Delta\beta$  vidíme, že klesá přenos výkonu  $P_1(z)$  a roste frekvence funkce.



Obr. 2: Graf průběhu funkcí výkonu při  $\beta_1 \neq \beta_2$ .



Obr. 3: Grafy průběhu výkonu  $P_1(z)$  při změně  $\Delta\beta$ .

Z rovnic (11) a (12) můžeme snadno určit pozice, ve kterých budou hodnoty přenosu výkonů  $P_1(z)$  a  $P_2(z)$  nabývat minima, respektive maxima. Pro maximum  $P_1(z) = P_1(0)$  platí toto odvození:

$$\begin{aligned} \cos^2(\kappa z) &= 1 \rightarrow \cos(\kappa z) = \pm 1, \\ \cos(\kappa z) &= \pm 1 \Leftrightarrow \forall z: z = \frac{m \cdot \pi}{\kappa}; m \in N. \end{aligned} \tag{13}$$

Ze zákona zachování energie pak musí platit, že  $P_2(z) = 0$ . Maximální výkon v prvním vlákne je tehdy, je-li z rovno celočíselnému násobku poměru  $\frac{\pi}{\kappa}$ .

Pro maximum výkonu v druhém vlákne musí platit, že  $P_2(z) = P_1(0)$ . Toto platí tehdy, když

$$\begin{aligned} \sin^2(\kappa z) &= 1 \rightarrow \sin(\kappa z) = \pm 1, \\ \sin(\kappa z) &= \pm 1 \Leftrightarrow \forall z: z = \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\pi}{\kappa}; m \in N. \end{aligned} \quad (14)$$

Pro minimální vzdálenost  $L_c$ , při které dojde k přenosu veškerého výkonu z prvního vlákna do druhého, platí podle matematického zápisu v rovnici (14) následující vztah:

$$z = L_c = \frac{\pi}{2\kappa}. \quad (15)$$

Ze zápisu rovnice (15) je patrné, že s rostoucí hodnotou koeficientu vazby  $\kappa$  klesá  $L_c$  [1].

### 2.1.2 Koeficient vazby

V uvedených vzorcích se vyskytuje koeficient vazby  $\kappa$ , který určuje intenzitu interakce mezi vlákny. Čím je hodnota tohoto koeficientu vyšší, tím vyšší je i interakce mezi vlákny. Pro výpočet přesné hodnoty koeficientu vazby slouží vzorec

$$\kappa(d) = \frac{\lambda_0}{2\pi n_1} \cdot \frac{U^2}{a^2 V^2} \cdot \frac{K_0\left(W \frac{d}{a}\right)}{K_1^2(W)}. \quad (16)$$

$$U = k_0 a \sqrt{n_1^2 - n_e^2}, \quad (17)$$

$$W = k_0 a \sqrt{n_e^2 - n_2^2}, \quad (18)$$

$$V = \sqrt{U^2 + W^2} = k_0 a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = k_0 a N A, \quad (19)$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}, \quad (20)$$

$$n_e = \frac{\beta}{k_0}, \quad (21)$$

kde  $\lambda_0$  představuje vlnovou délku světla ve vakuu,  $n_1$  a  $n_2$  jsou indexy lomu jádra a pláště vlákna,  $a$  je poloměr jádra vlákna,  $d$  je vzdálenost mezi osami jader vláken a  $K_\nu(x)$  představuje modifikovanou Besselovu funkci řádu  $\nu$  (tedy řádu 0, respektive 1). Z rovnice (19) je patrné, že hodnota  $V$  představuje normalizovanou frekvenci v optoelektronice určující, zda zadané parametry odpovídají jednovídnému ( $V \leq 2,405$ ) či mnohavidovému vláknu.

Pro ulehčení výpočtů byl odvozen jednodušší vzorec výpočtu

$$\kappa(d, V) = \frac{\pi\sqrt{\delta}}{2a} \cdot e^{-(A+B\tilde{d}+C\tilde{d}^2)}. \quad (22)$$

$$A = 5,2789 - 3,663V + 0,3841V^2, \quad (23)$$

$$B = -0,7769 + 1,2252V - 0,0152V^2, \quad (24)$$

$$C = -0,0175 - 0,0064V - 0,0009V^2, \quad (25)$$

$$\delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2}, \quad (26)$$

$$\tilde{d} = \frac{d}{a}. \quad (27)$$

Nepřesnost uvedeného vzorce pro výpočet koeficientu vazby je 1% při splnění následujících podmínek:

$$1,5 \leq V \leq 2,5 \text{ a } 2,0 \leq \tilde{d} \leq 4,5.$$

Ze vzorce (22) je patrné, že roste-li parametr  $\tilde{d}$ , pak hodnota koeficientu vazby klesá. Jelikož poloměr jádra vlákna je konstantní, pak můžeme soudit, že koeficient vazby ovlivníme jen pomocí změny vzdáleností jader vláken  $d$ . S růstem vzdáleností mezi osami vláken klesá hodnota koeficientu vazby a tedy i interakce mezi nimi, naopak s klesající vzdáleností os vláken koeficient vazby roste. Na tomto principu fungují některé vazební členy s laditelným dělicím poměrem [1].

## 2.2 Technologie FBT

Základní princip technologie FBT je zobrazen na obr. 4. Konkrétně se jedná o výrobu hvězdicového OVČ ze standardních SM vláken. Nejprve dojde ke svinutí dvou či více vláken s odstraněnou primární a sekundární ochranou (obr. 4, případ A). Oblast svinutí vláken (vazební oblast) bývá delší než 30 mm.

Následně dojde k rovnoměrnému zahřátí oblasti, kde jsou vlákna svinuta plynovým hořákem (obr. 4, případ B).

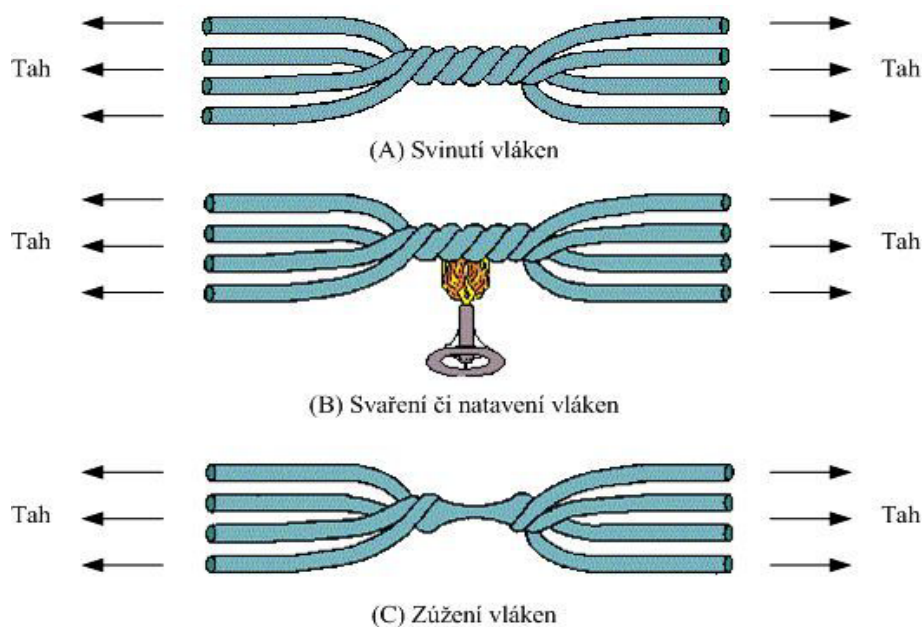
Působením tahu na oba konce svinutých vláken dojde při dostatečném zahřátí k vzájemnému spojení plášťů vláken a postupnému přibližování jader vláken (obr. 4, případ C), čímž dojde k překrytí módových polí vláken.

Roztahováním vláken také dochází ke zmenšování jejich průměru. Během výrobního procesu je na vstupní port připojen zdroj optického signálu, který se šíří na výstupy. Výstupy

jsou monitorovány optickými detektory. Takto se měří hodnota dělicího poměru v reálném čase. Po dosažení požadovaných hodnot je technologický proces ukončen.

Hlavní nevýhodou technologie FBT je především proces zahřívání vláken plynovým hořákem. Vlastnosti plamenu jsou vysoce závislé na podmínkách okolního prostředí. Tyto vlastnosti je velmi obtížné modelovat, výsledky jsou tedy nejisté a výroba problematická. Dalším nevýhodou tohoto způsobu výroby je možnost kontaminace vláken produkty hoření, především pak vodní parou. Řešení tohoto problému spočívá v nahrazení plynového hořáku, jako zdroje tepla pro nahřívání vazební oblasti svinutých vláken, dostatečně výkonným laserem, například CO<sub>2</sub> laserem. Použitím laseru jako zdroje tepla je výhodné hlavně z toho důvodu, že má velmi malou závislost na okolním prostředí a také žádné zplodiny hoření.

Technologii FBT je dále možné nahradit obdobnou technologií TDT. Technologie TDT pracuje na principu jevu termální difuze Ge<sup>2+</sup> iontů, která způsobí rozšíření průměru módového pole, aniž by bylo potřeba podélného tažení vlákna. Výhoda této technologie spočívá v tom, že nedochází k zužování vláken, které negativně ovlivňuje spolehlivost výrobku. Další výhodou je, že je možné využít zařízení doposud využívaná při výrobě technologií FBT, tudíž je snadné nasazení této technologie do výroby [1], [2], [3].



Obr. 4: Technologie FBT [4].



## 2.3 Technologie PLC

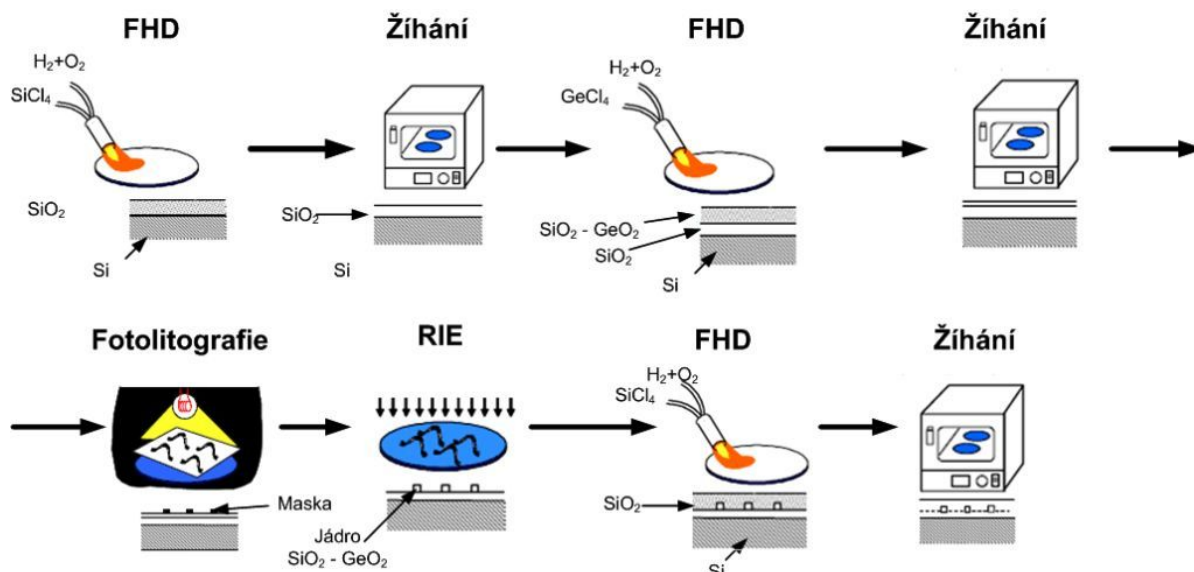
Princip technologie PLC spočívá ve vytvoření vlnovodů v podkladovém materiálu – substrátu. Oproti technologii FBT má technologie PLC výhodu především ve znatelně menších rozměrech a nižších výrobních nákladech, dále pak v nízkých hodnotách vložného útlumu, polarizačně závislých ztrát, výborné uniformitě a velkému rozsahu pracovních vlnových délek. Technologií PLC lze vytvářet OVČ s velkým počtem větvení. Běžně jsou k dostání PLC OVČ až se 128 výstupy. Vlnovody jsou vytvořeny difuzí materiálů zvyšujících index lomu nebo vytvořením vlnovodů pomocí fotolitografie, což je nejjednodušší technologie výroby.

Postup výroby pomocí fotolitografické metody je následující. Nejprve se pomocí plamenné hydrolýzy FHD vytvoření částice  $\text{SiO}_2$ , které jsou podobné sazí. FHD využívá kyslíkovodíkový plamen, do kterého se přidává směs plynů  $\text{SiCl}_4$ . Částice oxidu křemíku se usazují na křemíkovém waferu. Takto se vytváří plášť vlnovodu. Mohutnost této vrstvy by měla být alespoň 30  $\mu\text{m}$ . Z důvodu pórovitosti není tato vrstva prozatím vhodná pro struktury vlnovodů. Proto následuje proces žihání při teplotě 1300  $^\circ\text{C}$ . Během tohoto procesu dojde k roztavení částic  $\text{SiO}_2$  a jejich spojení v jednu homogenní vrstvu. Teplota tání oxidu křemíku se musí uměle snížit, jelikož je vyšší než teplota tání křemíkového waferu. Toho se docílí tak, že se do směsi plynů při procesu FHD přidávají další plyny s příměsí bóru nebo fosforu. Po ukončení žihání se provede nanesení další vrstvy pomocí FHD, která vytvoří jádro vlnovodu. Nyní se ovšem do směsi plynů přidává  $\text{GeCl}_4$  namísto  $\text{SiCl}_4$ . Výsledná vrstva germaniem dotovaného oxidu křemíku je opět podrobena procesu žihání. Následně je nanesena maska pomocí fotolitografie tvořící stopy vlnovodů, která zabrání procesu reaktivního iontového leptání RIE a tím odstranění dotované vrstvy pod maskou. Nyní máme vytvořeny jádra vlnovodů, na které zespodu přiléhá materiál pláště. Posledním krokem je nanesení horní vrstvy pláště vlnovodu, který zakryje jeho jádro opět pomocí technologie FHD obdobně jako v prvním kroku. Popisovaný postup výroby je znázorněn na obr. 5. Jelikož se využívá plamenu na bázi kyslíku a vodíku, hrozí nebezpečí kontaminace vytvářené struktury OH ionty, které zvyšují útlum a zhoršují tak parametry výsledného OVČ [5], [6].

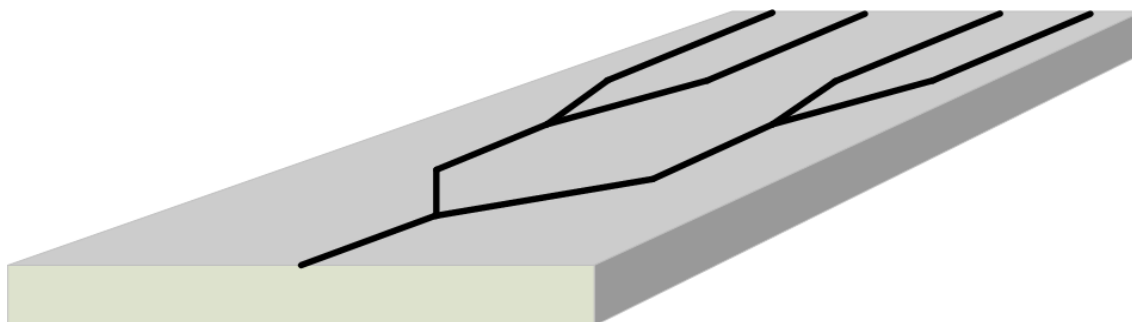
Pro technologii planárních vlnovodů jsou vyžadovány extrémně čisté materiály. Jelikož rozměry vlnovodů jsou velmi malé, ve srovnání s rozměry nečistot by mohlo dojít ke znehodnocení celé součástky vlivem nečistoty, která brání průchodu signálu.

Samotné OVČ se vytváří pomocí rozvětvení vstupního vlnovodu. Vlnovod se dělí vždy do dvou větví. Toto větvení má tvar písmene Y, dělicí poměr se nastavuje asymetrií výstupu. Pro menší hodnotu dělicího poměru větve bude výstup umístěn dále od osy vstupního vlnovodu, pro větší hodnotu

dělicího poměru bude výstup umístěn blíže k ose vstupního vlnovodu. Na obr. 6 je schematicky znázorněn OVČ 01x04 vyrobený technologií PLC [5].



Obr. 5: Výroba vlnovodů technologií PLC.



Obr. 6: Vlnovody PLC OVČ 01x04.

### 3. NAMĚŘENÉ PARAMETRY DOSTUPNÝCH JEDNOVIDOVÝCH OVČ

Měřením na OVČ je možno ověřovat parametry udávané výrobcem. Případně se měří hodnoty, které výrobce daného vazebního členu neměří nebo neuvádí v dokumentaci k výrobku. Může se jednat například o měření hodnoty útlumu při hodnotě vlnové délky zdroje záření, která se nenachází v rozsahu vlnových délek uvedených v dokumentaci.

Způsoby měření se mírně liší v závislosti na tom, zda se měří hodnoty prvku určeného pro síť s vlnovým multiplexem či nikoliv. Při měření na prvcích určených právě pro WDM je nutné se soustředit právě na hodnoty vlnových délek použitých/podporovaných kanálů.

Pro přesná měření je potřeba mít k dispozici řádně kalibrované přístroje zaručující přesné hodnoty měřených veličin po celou dobu měření. Jedná se hlavně o zdroj záření a detektor, kde u zdroje záření je nutné zajistit konstantní a neměnnou hodnotu vyzařovaného výkonu.

Měření může být dále ovlivněno okolním prostředím, typicky se jedná o okolní teplotu a prašnost. Dalším nežádoucím vlivem při měření je vliv vibrací či pohybu s přírodními kabely. Obzvláště při měření prvků používajících SM vlákna je třeba dbát na to, aby nedošlo k velkému ohybu vlákna. Z důvodu malého průměru jádra vlákna se přenáší velká část výkonu také v plášti vlákna v podobě evanescentní vlny, díky tomu je vlákno citlivé na ohyby, při kterých dochází k porušení podmínky totálního odrazu a ztrátám výkonu vyvázáním světla z vlákna.

Je také potřeba vzít v potaz vliv použitých konektorů, jejich ferulí a použitých spojek, které mají vliv na hodnoty útlumu. Hodnoty útlumu dvou stejných OVČ s různými konektory se mohou lišit. Někdy také výrobci OVČ uvádějí hodnoty útlumu součástky bez konektorů.

#### 3.1 Měření jednovidových optických vazebních členů

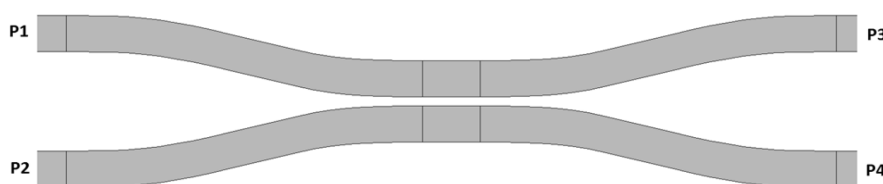
Pro měření byly vybrány čtyři OVČ od výrobce Optokon s jedním vstupem a dvěma výstupy s konektory typu FC a SC s ferulí typu SPC. Všechny měřené OVČ jsou vyrobené technologií SFT, která je obdobná technologii FBT. Pro připojení k předřadnému vláknu byla použita spojka podle typu použitého konektoru. Bylo prováděno měření pomocí metody vložných ztrát, kdy se změří pomocí optického detektoru výkon na konci předřadného vlákna. Provádí se několik měření, výsledná hodnota výkonu na konektoru je dána průměrem z provedených měření, který je pak v následujících výpočtech

použit jako výkon vstupní. Díky této metodě nejsou výsledné hodnoty útlumů ovlivněny útlumem konektorů předřadného vlákna a útlumem samotného předřadného vlákna.

Jako zdroj byl použit kalibrovaný přístroj EXFO FLS-300-235BL s možností skokově nastavovat hodnotu vlnové délky na hodnoty 1310 nm a 1550 nm s přesností  $\pm 20$  nm a 1490 nm s přesností  $\pm 10$  nm, šířka spektrální čáry použitého laseru je  $\leq 5$  nm, stabilitou výstupního výkonu 0,1 dB a dále pak zdroj NOYES OLS2 s možností nastavení vlnové délky 1310 nm a 1550 nm, který není kalibrovaný a nemá příliš stabilní výstupní výkon z důvodu jeho stárnutí. Jako detektor byl použit přístroj NOYES OPM1 a kalibrovaný detektor EXFO FPM 302-54. Ačkoliv použité detektory podporovaly funkci okamžitého přepočtu změřeného a referenčního výkonu uloženého v paměti na hodnotu útlumu a jeho zobrazení, nebyla tato funkce použita z důvodu zajištění větší přesnosti měření.

Před měřením, během měření a při každém rozpojení konektorů probíhala kontrola čistoty čel konektorů pomocí mikroskopu. Měření probíhalo pro hodnoty vlnových délek 1310 nm, 1490 nm a 1550 nm, protože se hodnota výstupního výkonu v závislosti na vlnové délce mění, je nutné při každé změně hodnoty vlnové délky na zdroji optického signálu změřit hodnotu výkonu na konci předřadného vlákna.

Na obr. 7 je zakresleno přehledové schéma OVČ s dvěma vstupními porty označenými P1 a P2 a dvěma výstupními porty označenými P3 a P4. Většina OVČ vyskytujících se na trhu nemá vstup P2 vyveden. Počty vstupů a výstupů OVČ se označují výrazem „0Ax0B“, kde za písmeno „A“ se dosazuje počet vstupů a za písmeno „B“ počet výstupů, např. 01x02, 01x04, 01x128, 02x02 (viz. obr. 7) atp. Počet výstupů bývá hodnota mocniny o základu 2.



Obr. 7: Přehledové schéma OVČ 02x02.

### 3.1.1 Měřené veličiny

Při měření OVČ se měří především:

- zbytkový útlum,
- vložený útlum,
- útlum přeslechu,

- dělicí poměr,
- polarizačně závislé ztráty.

Případně se také měří rozsah pracovních vlnových délek, ve kterých OVČ splňuje výše uvedené hodnoty s danou přesností, a dále pak uniformita. Hodnoty měřených útlumů se vždy vztahují k vlnové délce nebo k rozsahu pracovních vlnových délek.

Zbytkový útlum v katalogových listech zahraničních firem uváděn jako *excess loss* představuje ztráty optického výkonu v OVČ. Nejedná se o hodnotu útlumu, která je dána zvoleným dělicím poměrem. Ideální hodnota zbytkového útlumu je 0 dB, typicky se pohybuje v rozmezí hodnot 0,1 – 0,3 dB. Hodnotu zbytkového útlumu lze ovlivnit volbou vhodné technologie výroby a přesností výroby. Výpočet zbytkového útlumu uvádí vzorec (28), označení  $P_x$  představují hodnoty výkonu na konektorech měřeného OVČ odpovídajícího obr. 7, kde „x“ představuje číselné označení konektoru. Jedná se tedy o poměr výkonu přivedeného na vstupní konektor a součtu výkonů na výstupních konektorech.

$$A_{zb} = 10 \log \frac{P_1}{P_3 + P_4} \quad (28)$$

Vložený útlum uváděný také jako *insertion loss* představuje hodnotu útlumu měřenou mezi vstupem a jedním výstupem. Jedná se o součet zbytkového útlumu a útlumu daného dělicím poměrem. Hodnota vložného útlumu je velmi důležitá při návrhu optické trasy, protože představuje hodnotu, o kterou se navýší celkový útlum větve trasy. Vzorec výpočtu pro vložený útlum měřený mezi konektory P1 a P3 uvádí rovnice (29) a pro vložený útlum mezi konektory P1 a P4 rovnice (30). V katalogových listech se lze setkat s maximální hodnotou vložného útlumu a typickou hodnotou vložného útlumu.

$$A_{vl} = 10 \log \frac{P_1}{P_3} \quad (29)$$

$$A_{vl} = 10 \log \frac{P_1}{P_4} \quad (30)$$

Útlum přeslechu, nebo též směrovost, anglicky označovaný jako *crosstalk* či *directivity* určuje hodnotu útlumu (stupeň izolace) výkonu mezi vstupními porty. Hodnota výkonu naměřeného přeslechu by měla být nulová a tedy hodnota útlumu přeslechu maximální. Rovnici výpočtu uvádí vzorec (31). Katalogové hodnoty bývají udávány jako vyšší než 55 dB.

$$A_{pr} = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \quad (31)$$

Dělicí poměr označován také jako *coupling ratio* udává, jak velká část výkonu se nachází na daném výstupu vzhledem k celkovému výkonu na výstupech. Nejčastěji se uvádí v procentech. Vzorec

výpočtu je uveden v rovnici (32). Hodnota dělicího poměru má vliv na hodnotu vložného útlumu. Větvením optického signálu dochází ke snižování výkonu na výstupech právě podle hodnoty dělicího poměru. Celkový součet všech dělicích poměrů přiřazených k jednotlivým výstupům musí být 100%.

$$D_p = \frac{P_3}{P_3 + P_4} \cdot 100 \quad (32)$$

$$A_D = -10 \cdot \log \frac{D_p}{100} \quad (33)$$

Tabulka 1 popisuje hodnoty útlumu OVČ se dvěma výstupy podle hodnoty dělicího poměru. Přepočet hodnot se provádí podle vzorce (33), kde za hodnotu  $D_p$  dosazujeme procentuelní hodnotu dělicího poměru výstupu, pro který chceme vypočítat hodnotu útlumu. Hodnoty uvedené v tabulce nezahrnují vliv zbytkového útlumu OVČ, hodnoty z tabulky by tedy měly mít ideální OVČ. Skutečné hodnoty v současné době vyráběných OVČ jsou vyšší přibližně o 0,1-0,3 dB.

Tab. 1: Útlum výstupů podle hodnoty dělicího poměru.

Dělicí poměr [%]	Útlum výstup 1 [dB]	Útlum výstup 2 [dB]
1/99	20,00	0,04
10/90	10,00	0,46
20/80	6,99	0,97
30/70	5,23	1,55
40/60	3,98	2,22
50/50	3,01	3,01

Polarizačně závislé ztráty anglicky označované jako *polarization dependent loss* - *PDL* určují maximální změnu vložného útlumu způsobenou změnou směru polarizace optického signálu. Tyto ztráty jsou způsobené mírnou závislostí vlastností OVČ na směru polarizace světla, které vstupuje do OVČ. Katalogová hodnota PDL bývá maximálně 0,3 dB. Vzorec výpočtu hodnoty PDL uvádí rovnice (34). Hodnota PDL může být kritická při návrhu rozsáhlých optických sítí. Jelikož se směr polarizace signálu mění nahodile podél vlákna, nejsme schopni určit přesnou hodnotu PDL. Proto je nutné při výstavbě optické sítě volit prvky s minimální možnou hodnotou PDL [7].

$$PDL_{dB} = 10 \cdot \log \frac{P_{Max}}{P_{Min}} \quad (34)$$

Uniformita se určuje pro OVČ mající na výstupech stejné hodnoty dělicího poměru. Vyjadřuje rovnoměrnost rozdělení výkonu mezi jednotlivými výstupy. Jedná se o rozdíl hodnot portu

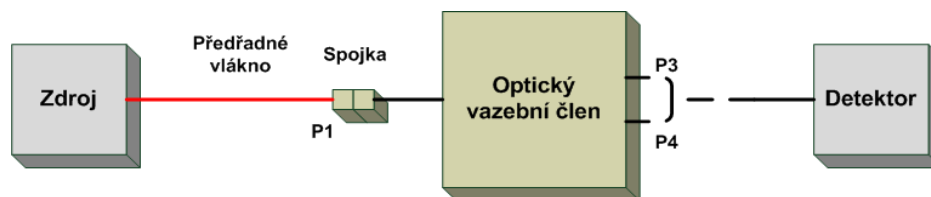
s maximálním vložným útlumem a portu s minimálním vložným útlumem při dané vlnové délce. V katalogích bývá uvedena maximální hodnota uniformity změřená v rozsahu daném pracovními vlnovými délkami. Z katalogových hodnot je patrné, že hodnota uniformity roste s počtem výstupů a pohybuje se v rozmezí maximálních hodnot od 0,5 dB pro PLC splitter 01x02 po 3 dB pro PLC splitter 01x128.

### 3.1.2 Postup měření

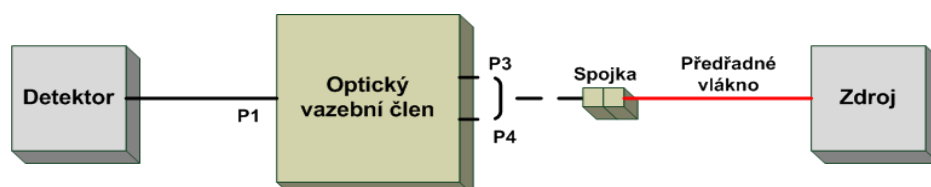
Pro měření vložného útlumu, zbytkového útlumu a dělicího poměru bylo použito zapojení podle blokového schématu uvedeného na obr. 8. Jelikož se měřilo metodou vložných ztrát, bylo potřeba změřit výkon, který je na konci SM předřadného vlákna a vstupuje do měřeného OVC. Ke spojení předřadného vlákna a OVC byla použita SM spojka s maximální hodnotou vložného útlumu 0,2 dB. Výsledná hodnota výkonu na konektoru byla určena jako průměrná hodnota ze tří provedených měření. Změřením výkonu P3 a P4 a dosazením do vzorců (28), (29), (30) a (32) byly získány hodnoty vložného útlumu, zbytkového útlumu a dělicího poměru. Toto měření se opakovalo pro vlnové délky 1310 nm, 1490 nm a 1550 nm. Při změně vlnové délky je potřeba změřit hodnotu výkonu na konci předřadného vlákna, protože změnou vlnové délky došlo ke změně jeho úrovně. Po změření a zapsání všech hodnot bylo předřadné vlákno se zdrojem optického signálu připojeno na konektor P3 a celé měření se opakovalo. Stejně tak i pro konektor P4. Blokové schéma zapojení je na obr. 9. Pro případ měření se zdrojem signálu na konektoru P1 nebylo možné změřit útlum přeslechu, jelikož nebyl k dispozici konektor P2 (nebyl vyveden). Výsledkem měření je pro každou vlnovou délku 6 naměřených hodnot. Uspořádání naměřených hodnot popisuje tabulka 2, kde hodnota „Ref. (P1)“ představuje výkon na konci předřadného vlákna. Přepojením předřadného vlákna k jinému konektoru dojde k přeznačení jednotlivých konektorů podle tabulky 2. Například připojením konektoru předřadného vlákna na konektor označený na obr. 7 jako P3 se mění značení konektorů takto: P3 na P1, P4 na P2, P1 na P3, P2 na P4. Jak již bylo zmíněno výše, konektor P2 nebyl vyveden, proto na něm nebylo možné provést měření. Díky tomuto přeznačení se mohou aplikovat uvedené vzorce pro výpočet parametrů měřeného OVC a nemusí se provádět jejich úpravy.

*Tab. 2: Uspořádání naměřených hodnot na výstupech OVC.*

Vstup v pozici P1	Ref. (P1)	-	P3	P4
Vstup v pozici P2	-	-	-	-
Vstup v pozici P3	P3	-	Ref. (P1)	P2
Vstup v pozici P4	P4	-	P2	Ref. (P1)



Obr. 8: Schéma zapojení pro měření zbytkového a vložného útlumu.



Obr. 9: Schéma zapojení pro měření zbytkového a vložného útlumu ze strany výstupů.



Obr. 10: Pouzdro měřeného OVČ Optokon 70/30.



Obr. 11: Vnitřní uspořádání OVČ Optokon 70/30.



Obr. 12: Detail výstupu OVČ Optokon 70/30.

Na obr. 10, obr. 11 a obr. 12 je vidět vnitřní uspořádání jednoho z měřených OVČ, kde vlákna zbavená primární a sekundární ochrany prochází železnou trubičkou, ve které probíhá výměna výkonu mezi vlákny. Vlákna jsou uvnitř trubičky zajištěna proti pohybu. Samotná trubička je přilepena lepidlem na oboustranně lepicím pásku, který je přichycen na pouzdro a brání tak pohybu samotné železné trubičky a také výměně tepla mezi trubičkou a kovovým pouzdem OVČ [8].



### 3.2 Měření OVČ 01x02 90/10

Měřený OVČ: Optokon SFT – S35 – 01x02 – 10 – CM1 – SPC – SPC

Tab. 3: Měření OVČ 90/10 při  $\lambda=1310$  nm.

Zdroj světla připojen na konektor 1:		Zdroj světla připojen na konektor 3:		Zdroj světla připojen na konektor 4:	
	P[ $\mu$ W]		P[ $\mu$ W]		P[ $\mu$ W]
P1	2712,00	P1	2712,00	P1	2712,00
P2	0,00	P2	7,82	P2	7,37
P3	246,20	P3	277,40	P3	0,00
P4	2423,00	P4	0,00	P4	2416,00

Tab. 4: Měření OVČ 90/10 při  $\lambda=1490$  nm.

Zdroj světla připojen na konektor 1:		Zdroj světla připojen na konektor 3:		Zdroj světla připojen na konektor 4:	
	P[ $\mu$ W]		P[ $\mu$ W]		P[ $\mu$ W]
P1	943,00	P1	943,00	P1	943,00
P2	0,00	P2	2,65	P2	2,48
P3	90,60	P3	90,50	P3	0,00
P4	813,00	P4	0,00	P4	810,10

Tab. 5: Měření OVČ 90/10 při  $\lambda=1550$  nm.

Zdroj světla připojen na konektor 1:		Zdroj světla připojen na konektor 3:		Zdroj světla připojen na konektor 4:	
	P[ $\mu$ W]		P[ $\mu$ W]		P[ $\mu$ W]
P1	1279,00	P1	1279,00	P1	1279,00
P2	0,00	P2	3,59	P2	3,43
P3	121,40	P3	127,10	P3	0,00
P4	1100,00	P4	0,00	P4	1132,00

Výsledné hodnoty:

Tab. 6: Tabulka vypočtených parametrů OVČ 90/10 při  $\lambda=1310, 1490, 1550 \text{ nm}$ .

	A[dB] $\lambda=1310 \text{ nm}$	A[dB] $\lambda=1490 \text{ nm}$	A[dB] $\lambda=1550 \text{ nm}$	Teoretická hodnota
Zbytkový útlum	0,069	0,185	0,200	0,000
Vložný útlum 1-3	10,420	10,170	10,230	10,000
Vložný útlum 3-1	9,900	10,180	10,030	10,000
Vložný útlum 1-4	0,490	0,640	0,650	0,460
Vložný útlum 4-1	0,500	0,660	0,630	0,460
Útlum přeslechu 3-4	25,400	25,510	25,520	>55,000
Útlum přeslechu 4-3	25,660	25,800	25,720	>55,000
Dělicí poměr	9,220	10,030	9,940	10,000

Srovnáním naměřených hodnot v tabulkách 3, 4, 5, vypočtených hodnot v tabulce 6 a hodnot uvedených výrobcem v katalogovém listu vidíme, že ani jedna hodnota vložného útlumu nepřesáhla maximální hodnotu vložného útlumu 11,7 dB, respektive 0,7 dB. Navíc hodnoty v katalogovém listu nezahrnují útlum konektorů. Typický zbytkový útlum 0,2 dB rovněž nebyl překročen. Hodnota útlumu přeslechu nedosahuje katalogových hodnot (>50 dB), ale naměřené hodnoty jsou uspokojivé [9].

### 3.3 Měření OVČ 01x02 70/30

Měřený OVČ: Optokon SFT – S35 – 01x02 – 30 – CM1 – SPC – SPC

Tab. 7: Měření OVČ 70/30 při  $\lambda=1310 \text{ nm}$ .

Zdroj světla připojen na konektor 1:		Zdroj světla připojen na konektor 3:		Zdroj světla připojen na konektor 4:	
	P[ $\mu\text{W}$ ]		P[ $\mu\text{W}$ ]		P[ $\mu\text{W}$ ]
P1	627,80	P1	627,80	P1	627,80
P2	0,00	P2	4,12	P2	3,87
P3	412,80	P3	417,30	P3	0,00
P4	177,70	P4	0,00	P4	170,50

Tab. 8: Měření OVC 70/30 při  $\lambda=1550$  nm.

Zdroj světla připojen na konektor 1:		Zdroj světla připojen na konektor 3:		Zdroj světla připojen na konektor 4:	
	P[ $\mu$ W]		P[ $\mu$ W]		P[ $\mu$ W]
P1	877,20	P1	877,20	P1	877,20
P2	0,00	P2	5,30	P2	5,53
P3	582,40	P3	576,30	P3	0,00
P4	257,80	P4	0,00	P4	243,50

Jelikož během tohoto měření nebyl k dispozici dostatečně stabilní laserový zdroj EXFO, byl použit zdroj optického výkonu NOYES, který má horší parametry a jeho výstupní výkon není tak stabilní. Při měření s použitím zdroje NOYES jsme nemohli měřit při vlnové délce 1490 nm, protože tuto vlnovou délku nepodporoval, měření tedy proběhlo jen pro vlnové délky 1310 nm a 1550 nm výsledky měření jsou v tabulkách 7 a 8.

Výsledné hodnoty:

Tab. 9: Tabulka vypočtených parametrů OVC 70/30 při  $\lambda=1310$ , 1550 nm.

	A[dB] $\lambda=1310$ nm	A[dB] $\lambda=1550$ nm	Teoretická hodnota
Zbytkový útlum	0,266	0,187	0,000
Vložný útlum 1-3	1,820	1,780	1,550
Vložný útlum 3-1	1,770	1,820	1,550
Vložný útlum 1-4	5,480	5,320	5,230
Vložný útlum 4-1	5,660	5,560	5,230
Útlum přeslechu 3-4	21,830	22,190	>55,000
Útlum přeslechu 4-3	22,100	22,000	>55,000
Dělicí poměr	69,910	69,320	70,000

Z tabulky 9 zobrazující výsledné vypočtené parametry je patrné, že výsledná hodnota dělicího poměru je v pořádku i přesto, že nebyl použit kalibrovaný zdroj optického signálu. Hodnoty vložného útlumu se od ideálních hodnot liší, avšak dle údajů z katalogu výrobce jsou stále menší než maximální přípustné hodnoty - 6,2 dB, respektive 1,9 dB. Zbytkový útlum pro vlnovou délku 1310 nm překročil výrobcem udávanou typickou hodnotu 0,2 dB o 0,066 dB. Nízké hodnoty útlumu přeslechu přisuzují velké šumovosti použitého detektoru s germaniovou fotodiodou.

### 3.4 Měření OVČ 01x02 50/50

Měřený OVČ: Optokon SFT – S35 – 01x02 – 50 – CM1 – SPC – SPC

Tab. 10: Měření OVČ 50/50 při  $\lambda=1310$  nm.

Zdroj světla připojen na konektor 1:		Zdroj světla připojen na konektor 3:		Zdroj světla připojen na konektor 4:	
	P[ $\mu$ W]		P[ $\mu$ W]		P[ $\mu$ W]
P1	2772,00	P1	2772,00	P1	2772,00
P2	0,00	P2	22,93	P2	24,37
P3	1370,00	P3	1365,00	P3	0,00
P4	1362,00	P4	0,00	P4	1368,00

Tab. 11: Měření OVČ 50/50 při  $\lambda=1490$  nm.

Zdroj světla připojen na konektor 1:		Zdroj světla připojen na konektor 3:		Zdroj světla připojen na konektor 4:	
	P[ $\mu$ W]		P[ $\mu$ W]		P[ $\mu$ W]
P1	925,00	P1	925,00	P1	925,00
P2	0,00	P2	7,40	P2	7,80
P3	455,70	P3	462,00	P3	0,00
P4	425,50	P4	0,00	P4	443,00

Tab. 12: Měření OVČ 50/50 při  $\lambda=1550$  nm

Zdroj světla připojen na konektor 1:		Zdroj světla připojen na konektor 3:		Zdroj světla připojen na konektor 4:	
	P[ $\mu$ W]		P[ $\mu$ W]		P[ $\mu$ W]
P1	1280,00	P1	1280,00	P1	1280,00
P2	0,00	P2	10,08	P2	10,29
P3	622,50	P3	626,50	P3	0,00
P4	623,80	P4	0,00	P4	635,20

Výsledné hodnoty:

Tab. 13: Tabulka vypočtených parametrů OVČ 50/50 při  $\lambda=1310, 1490, 1550 \text{ nm}$

	A[dB] $\lambda=1310 \text{ nm}$	A[dB] $\lambda=1490 \text{ nm}$	A[dB] $\lambda=1550 \text{ nm}$	Teoretická hodnota
Zbytkový útlum	0,063	0,210	0,116	0,000
Vložný útlum 1-3	3,060	3,075	3,131	3,000
Vložný útlum 3-1	3,076	3,014	3,103	3,000
Vložný útlum 1-4	3,086	3,372	3,122	3,000
Vložný útlum 4-1	3,067	3,197	3,043	3,000
Útlum přeslechu 3-4	20,820	20,969	21,037	>55,000
Útlum přeslechu 4-3	20,559	20,740	20,948	>55,000
Dělicí poměr	50,140	51,710	49,947	50,000

Pro tento OVČ je v katalogovém listu uvedena maximální hodnota uniformity 0,8 dB. Naměřená a vypočtená data jsou uvedena v tabulkách 10, 11, 12 a 13. Vypočtená hodnota vložného útlumu je v rozsahu 3,014 - 3,372 dB. Tomu odpovídá uniformita 0,358 dB, což splňuje parametry udávané výrobcem [9]. Je ovšem nutné podotknout, že rozsah pracovních vlnových délek použitých OVČ je  $1310 \text{ nm} \pm 40 \text{ nm}$  a  $1550 \text{ nm} \pm 80 \text{ nm}$ , přičemž měření bylo provedeno jen pro tři hodnoty vlnové délky a ukončeno hodnotou 1550 nm. Ačkoliv měření vykazuje, že hodnota uniformity je v pořádku, bylo by vhodné pro bezpečné tvrzení o správnosti hodnoty uniformity provést mnohem více měření s různými vlnovými délkami a to v celém spektru pracovních vlnových délek.

### 3.5 Měření WDM OVČ 01x02 1310/1550nm

Měřený OVČ: Optokon SFW – D35 – CM1 – SSC – SSC

Tab. 14: Měření WDM OVČ 1310/1550 při  $\lambda=1310 \text{ nm}$ .

Zdroj světla připojen na konektor 1:		Zdroj světla připojen na konektor 3:		Zdroj světla připojen na konektor 4:	
	P[μW]		P[μW]		P[μW]
P1	2960,00	P1	2960,00	P1	2960,00
P2	0,00	P2	0,38	P2	0,19
P3	7,69	P3	5,32	P3	0,00
P4	2470,00	P4	0,00	P4	2478,00

Tab. 15: Měření WDM OVČ 1310/1550 při  $\lambda=1550$  nm.

Zdroj světla připojen na konektor 1:		Zdroj světla připojen na konektor 3:		Zdroj světla připojen na konektor 4:	
	P[ $\mu$ W]		P[ $\mu$ W]		P[ $\mu$ W]
P1	1350,00	P1	1350,00	P1	1350,00
P2	0,00	P2	0,86	P2	0,01
P3	1150,32	P3	1162,35	P3	0,00
P4	16,12	P4	0,00	P4	14,32

Jelikož se v tomto případě jedná o dvoukanálový WDM OVČ pro vlnovou délku 1550 nm a 1310 nm, nebylo provedeno měření pro 1490 nm. Během měření byl použit kalibrovaný detektor EXFO, který má lepší parametry. To se projevilo především při měření velmi malých výkonů, kdy šumy na fotodiodě nejsou zanedbatelně malé ve srovnání s úrovní měřeného výkonu. Vidíme, že výkony změřené pomocí detektoru EXFO jsou přibližně o řád nižší než u měření prováděných detektorem NOYES, což dává rozdíl měřených hodnot 10 dB. Naměřené hodnoty jsou v tabulkách 14 a 15.

Výsledné hodnoty:

Tab. 16: Tabulka vypočtených parametrů WDM OVČ při  $\lambda=1310$ , 1550 nm.

	A[dB] $\lambda=1310$ nm	A[dB] $\lambda=1550$ nm
Zbytkový útlum	0,772	0,635
Vložný útlum 1-3	25,853	0,695
Vložný útlum 3-1	27,454	0,645
Vložný útlum 1-4	0,786	19,229
Vložný útlum 4-1	0,772	19,744
Útlum přeslechu 3-4	38,915	31,958
Útlum přeslechu 4-3	41,925	58,290

V katalogovém listu OVČ je uveden maximální vložný útlum 0,7 dB bez konektorů [10]. Vzhledem k tomu, že vypočtené hodnoty v tabulce 16 zahrnují i útlum konektorů můžeme říct, že měřený OVČ splnil parametry udávané výrobcem. Hodnoty izolace výkonů mezi jednotlivými kanály jsou menší. To platí hlavně pro vlnovou délku 1550 nm na portu určeném pro 1310 nm, kde byla hodnota izolace přibližně 19,5 dB. Při měření izolace na blízkém konci jsou hodnoty útlumů dost vysoké, což je v pořádku.

## 4. NÁVRH OVČ V PROSTŘEDÍ OPTIWAVE OPTIBPM

### 4.1 Popis prostředí OptiBPM

Aplikace OptiBPM kanadské společnosti Optiwave je CAD aplikací, která je určená pro návrh a provádění 2D či 3D simulací optoelektronických součástek. Instalace prostředí OptiBPM obsahuje několik aplikací, které vzájemně spolupracují. Mezi ty hlavní patří OptiBPM Layout designer, OptiBPM Profile designer, OptiBPM Simulator a OptiBPM Analyzer. V této práci byla na počátku použita verze OptiBPM 9, později však byla nahrazena verzí OptiBPM 10. Verze 9 je kompatibilní s verzí 10, avšak verze 10 není zpětně kompatibilní s verzí 9.

Hardwarové a softwarové požadavky nejsou s ohledem na výkony současných desktopových počítačů přehnané. Minimálními požadavky jsou procesor Pentium 3, nebo obdobný procesor, dále pak 128 MB operační paměti RAM, 400 MB volné kapacity na pevném disku pro instalaci aplikace a grafickou kartu podporující rozlišení alespoň 1024 x 768 a 256 barev. Požadavky na operační systém jsou omezeny jen na produkty firmy Microsoft a to konkrétně na verze od Microsoft Windows XP s instalovaným service packem 3 po Microsoft Windows 7. Pro zkrácení doby simulace je vhodné použít co nejvýkonnější procesor. Jelikož simulace provádí diskretizaci návrhu na body, ve kterých provádí výpočty a následnou aproximaci pro určení hodnot mezi těmito body, je vhodné pro vyšší přesnost výpočtu použít větší počet takovýchto bodů. Větší počet bodů má ovšem větší nároky na kapacitu paměti RAM, platí tedy, že pro větší přesnost je potřeba větší kapacita operační paměti. Dále aplikace pro svou funkci vyžaduje mít zapojený licenční klíč v USB portu.

Aplikace OptiBPM použitá při řešení této diplomové práce běžela na serveru katedry telekomunikační techniky fakulty FEI VŠB-TU Ostrava. Přístup k serveru byl umožněn pomocí aplikace „Připojení ke vzdálené ploše“ a bylo tedy možné s aplikací pracovat odkudkoliv. Při práci s aplikací se vytvářejí dva základní typy souborů s příponami „\*.bpd“ a „\*.bpa“. Soubor s příponou „\*.bpd“ obsahuje samotný návrh součástky a jeho velikost se pohybuje v řádech desítek kilobajtů, spouští se v OptiBPM Layout designeru. Soubor „\*.bpa“ je výsledný soubor po provedené simulaci a jeho velikost je závislá na přesnosti simulace a požadovaných výstupech. Velikost souboru může dosáhnout stovek megabajtů. Díky tomu, že máme k dispozici i soubor s výsledky simulace, není potřeba opětovně spouštět simulaci, která může být časově náročná a tak můžeme snadno zpracovávat či prezentovat výsledky jednotlivých simulací [11].

## 4.2 Matematické řešení simulace

Softwarové prostředí OptiBPM využívá metodu konečných diferencí FD-BPM, která je jednou z nejvýkonnějších technik vyšetřování lineárních a nelineárních světelných jevů šířících se podél osy vlnovodu, jako jsou například OVČ, zužované vlnovody (tapery) či vlnovody esovitě zahnuté. Stejně jako metoda konečných derivací v časové oblasti (FDTD) i FD-BPM řeší Maxwellovy rovnice použitím konečných diferencí namísto parciálních derivací. Je tedy výpočetně náročnější, ale umožňuje přesněji modelovat velké množství různých zařízení. Metoda FD-BPM se od metody FDTD liší také tím, že veškeré prováděné výpočty jsou ve frekvenční oblasti a nikoliv v časové. Dále také používá SVEA (Slow Varying Envelope Approximation) aproximaci z důvodu zjednodušení rovnic, které pak obsahují nižší řády parciálních derivací. Podmínkou ovšem je, že obálka procházející optické vlny se nesmí příliš měnit v čase ani v prostoru v porovnání s její vlnovou délkou  $\lambda$ . Většina světla musí tedy procházet vlnovodem co nejvíce ve směru optické osy vlnovodu. OptiBPM implicitně předpokládá, že osa šíření světla je osa  $z$  [12].

Použitá aproximace SVEA (Slowly Varying Envelope Approximation) předpokládá, že složky intenzity elektrického pole  $E_x$  a  $E_y$  se mění velmi rychle ve směru osy  $z$ , ale pomalu ve směrech  $x$  a  $y$ .

Na námi vytvořený návrh vlnovodu software OptiBPM aplikuje síť s uzly, kde každému uzlu je přiřazen index lomu podle jeho pozice v návrhu a vypočteno elektromagnetické pole. Elektromagnetické pole je ovlivněno rozložením návrhu, protože index lomu je funkcí pozice  $n(x, y, z)$ . Diferenciální operátory se nahrazují konečnými diferencemi. Pro výpočet elektromagnetického pole v jednotlivých bodech stačí znát jednu hodnotu elektromagnetického pole v některé z transverzálních rovin  $x - y$  typicky se jedná o transverzální rovinu na začátku vlnovodu.

V případě, že vlnovodem prochází lineárně polarizované světlo, není nutné vyšetřovat obě složky pole  $e_x$  a  $e_y$ . Stačí určit pouze jednu z nich podle polarizace a druhou je možné zanedbat. V případě struktury s velmi malou změnou indexu lomu nedochází v rovnicích k velkým změnám hodnot. Proto se rovnice redukuje z vektorového na skalární tvar [12].



#### 4.2.1 Konečné řešení rovnic

Aplikací SVEA aproximace na Maxwellovy rovnice dojdeme ke vztahu

$$2jkn_0 \frac{\partial}{\partial z} \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{xx} & P_{xy} \\ P_{yx} & P_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix}, \quad (35)$$

kde složky matice operátoru P jsou

$$P_{xx} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial x} n^2 \cdot \right] + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k^2(n^2 - n_0^2), \quad (36)$$

$$P_{xy} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial y} n^2 \cdot \right] - \frac{\partial^2}{\partial x \partial y}, \quad (37)$$

$$P_{yx} = \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial x} n^2 \cdot \right] - \frac{\partial^2}{\partial y \partial x}, \quad (38)$$

$$P_{yy} = \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial y} n^2 \cdot \right] + \frac{\partial^2}{\partial x^2} + k^2(n^2 - n_0^2). \quad (39)$$

První výrazy operátoru P jsou násobeny složkami intenzity elektromagnetického pole  $e_x$  nebo  $e_y$ .

V případě lineárně polarizovaného světla platí vztahy

$$2jkn_0 \frac{\partial e_x}{\partial z} = P_{xx} e_x, \quad (40)$$

$$2jkn_0 \frac{\partial e_y}{\partial z} = P_{yy} e_y. \quad (41)$$

V případě struktury s velmi malou změnou indexu lomu platí toto:

$$P = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k^2(n^2 - n_0^2). \quad (42)$$

Konečným řešením pomocí konečných diferencí je vztah

$$\mathbf{e}_t(z_1) = e^{\frac{\Delta z P}{2jkn_0}} \mathbf{e}_t(z_0), \quad (43)$$

kde  $\Delta z = z_1 - z_0$ . Známe-li pole  $\mathbf{e}_t$  v transversální rovině  $z_0$ , pak jsme také schopni určit pole v rovině  $z_1$ .

Uvedenou exponenciální funkci převedeme na funkci racionální pomocí Padého aproximace 1. řádu. Jedním z omezení aproximace je velikost kroku  $\Delta z$ . Pro větší hodnoty kroků  $\Delta z$  je nutné použít Padého aproximaci vyšších řádů. Výsledné řešení rovnice vede na použití Crank-Nicholsonovy metody. Získáme soustavu rovnic. Hodnotu  $\mathbf{e}_t$  získáme řešením soustavy rovnic pomocí implicitní metody, která vyžaduje znalost řešení soustavy rovnic předchozí transversální roviny.

Pro urychlení výpočtu řešení se používá metoda ADI (*Alternating Direction Implicit*). Tato metoda přetransformuje používaný lineární systém na systém tridiagonální, který se pak řeší mnohem jednodušeji použitím Gaussovy eliminace [12].

#### 4.2.2 Hraniční podmínky výpočetního okna

Pro zamezení vzniku odrazů na okrajích výpočetního okna je nutné definovat hraniční podmínky. V případech, kde se hraniční podmínky nepoužívají, vznikají odrazy na okraji výpočetního okna a dochází tak k silnému ovlivnění přesnosti výpočtu. Definice hraničních podmínek existuje několik, mezi základní patří hraniční podmínky ABC, TBC či PML, kde metody PML a TBC jsou využívány nejčastěji pro jejich vysokou efektivitu.

Hraniční podmínka ABC (*Absorbing Boundary Condition*) je založena na principu obklopení výpočetního okna absorpčním materiálem s minimální odrazivostí na rozhraní mezi výpočetním oknem a absorpčním materiálem, což vyžaduje pečlivé nastavení tloušťky a absorpčního koeficientu použitého materiálu. Nevýhodou metody ABC je nutnost zajištění dodatečného výpočetního času a paměťových prostředků.

Metoda TBC (*Transparent Boundary Condition*) pro zamezení odrazů od hranic výpočetního okna nepoužívá absorpční materiál, ale předpokládá, že v blízkosti hranic elektromagnetické pole exponenciálně klesá. Použitím metody TBC není nutné nastavovat žádné parametry jako u metody ABC.

Třetí metodou, která je nejhojněji používaná je metoda PML (*Perfectly Matched Layer*). Metoda PML se podobá metodě ABC využitím materiálu, který obklopuje výpočetní okno. Tento materiál vykazuje anizotropní chování vodivosti, což zajišťuje velmi malé odrazy na rozhraní výpočetního okna a materiálu PML [12].

### 4.3 Tvorba optického vazebního členu v prostředí OptiBPM

Proces návrhu a tvorby požadovaného OVČ lze v prostředí OptiBPM rozdělit do tří kroků.

1. Návrh profilu vlnovodu, jeho struktury a zadefinování parametrů použitých materiálů, jako jsou například indexy lomu a elektrooptické koeficienty v prostředí OptiBPM Profile designeru.
2. Návrh součástky v OptiBPM Layout designeru a nastavení parametrů simulace.
3. Spuštění simulace a vyhodnocení výsledků v OptiBPM Analyzeru, který nabízí možnost nejen grafického zobrazení výsledků simulace, ale i jejich export například do aplikace OptiSystem.

#### 4.3.1 OptiBPM Profile designer

Při spuštění aplikace *OptiBPM Waveguide Layout Designer* a kliknutím na tlačítko pro vytvoření nového návrhu se zobrazí dialogové okno se základními nastavitelnými parametry návrhu. Jedná se především o nastavení rozměrů prostředí, do kterého budeme návrh umisťovat tzv. waferu. Dále pak o volbu materiálu substrátu a okolního prostředí, ze kterých se *wafer* skládá. Také se zde nastavuje výchozí šířka vlnovodu a především pak jeho profil. Jelikož doposud nemáme vytvořeny žádné materiály ani profily vlnovodů, nemáme v nabídkách žádnou možnost volby. Proto je nutné otevřít *Profile designer* stisknutím tlačítka „*Profiles And Materials*” a vytvořit je.

Zobrazí se nové okno Profile designeru, který se tváří jako samostatná aplikace, která je přímo provázaná s Layout designerem. Jakákoliv provedená a uložená změna v Profile designeru se okamžitě promítne do Layout designeru. Je tedy možné v budoucnu upravit již vytvořený a v projektu použitý profil. Okno je rozděleno do tří částí. Částí se stromovou nabídkou tzv. *Library browser*, návrhovou částí, ve které se zobrazují dialogová okna vytvářených materiálů a nastavují se jejich vlastnosti, a částí zobrazující upozornění a chybová hlášení.

V *Library browseru* se zobrazují právě otevřené projekty v OptiBPM, kde každému projektu je přiřazena právě jedna stromová struktura. Názvy těchto struktur odpovídají názvům projektů. Pokud vytváříme nový projekt, neměli jsme možnost jej doposud uložit a pojmenovat, pak Profile designer takovému neuloženému projektu přiřadí dočasný název „OptiBPM Designer1“, kde pomocí čísla na konci názvu snadno určíme vytvářený projekt, jelikož v jeden okamžik můžeme vytvářet více projektů, které mohou být také neuložené. Každý strom je rozdělen na části s definovanými materiály a části s vytvořenými profily. Aby se mohly vytvářet profily vlnovodů, je potřeba zadefinovat materiály, ze kterých se budou tyto profily skládat. Je možno definovat materiály elektrod, dielektrické materiály a materiály, které budou difundovány do materiálu substrátu waferu. U každého z těchto tří typů je možno nastavit široké spektrum parametrů jako jsou komplexní hodnoty indexu lomu jak pro isotropní, tak pro anizotropní chování, dále pak koeficienty elektrooptického jevu a také permitivitu daného materiálu. Jelikož je krystal výchozího materiálu lithiumniobátu dvojlomného, lze u tohoto materiálu použitého jako substrátu při difuzi nastavit jak řádný, tak i mimořádný index lomu. Případně nechat nastavení těchto indexů lomu na automatickém výpočtu podle Sellmeierových rovnic. Výchozí hodnoty elektrooptických koeficientů a permitivity jsou přednastaveny pro lithiumniobát, v případě použití jiného materiálu substrátu je nutné tyto parametry změnit.

Vytvoříme tedy požadované materiály, například v dielektrických materiálech *Dielectric* definujeme materiál pro jádro a okolní prostředí vlnovodu, kde do pole pro reálnou část komplexního čísla zadáme

hodnoty indexů lomu pro izotropní chování ve 2D i 3D a uložíme. Nyní když máme vytvořené materiály, můžeme vytvářet profily vlnovodů.

V Profile designeru existuje široká škála profilů. Požadujeme-li obdélníkový či čtvercový profil, použijeme složku *Channel*. Zde je možno definovat materiál profilu a jeho jednotlivé vrstvy v případě, jedná-li se o složitější profil složený z více různých materiálů. Každé vrstvě je možno nastavit její mohutnost (výšku), šířku a pozici případně zkosení hran a vytvoření tak lichoběžníku či rovnoběžníku. Každá vrstva se může skládat z jiného materiálu.

Pokud požadujeme kruhový či eliptický profil, vytvoříme jej ve složce *Fiber*. Je možno nastavovat poloměr kruhového profilu ve směru osy X a Y a dosáhnout takto eliptického tvaru. Stejně jako u profilu typu *Channel*, je i zde možno vytvářet jednotlivé vrstvy. Tyto vrstvy mají tvar kruhů či elips a mají vždy společný střed. Tato volba je výhodná například pro návrhy jednoduchých profilů optických vláken s posunutou disperzí.

Dalším z předpřipravených profilů jsou profily vytvořené difúzí materiálu do materiálu substrátu ve výchozím nastavení složeného z krystalu lithiumniobátu  $\text{LiNbO}_3$ . Na výběr je difuze titanu, který zvyšuje index lomu s názvem *Ti:LiNbO<sub>3</sub> profile*, manganu, který index lomu snižuje s názvem *Mg:LiNbO<sub>3</sub> profile*, případně zvolit protonovou výměnu *H<sup>+</sup>:LiNbO<sub>3</sub> profile*, kde dochází k nahrazování iontů lithia  $\text{Li}^+$  ionty vodíku  $\text{H}^+$  a výsledkem je změna indexu lomu.

U materiálové difúze nejsme omezeni jen na difúzi manganu či titanu, ale můžeme difundovat jakýkoliv materiál, známe-li potřebné tabulkové parametry zvoleného materiálu, jako je jeho hustota a molární hmotnost. Lze také ovlivnit průběh distribuční funkce indexu lomu a nastavit hloubku a šířku oblasti, kde k difuzi dochází. Hloubku a šířku difundované oblasti lze také nastavit zadáním některých technologických parametrů, jako je teplota difuze, teplotní konstanta, doba trvání difuze a difúzní konstanty pro vertikální a horizontální směr.

Profil vytvořený pomocí protonové výměny vytvoříme rovněž dosazením výrobních parametrů. Například zdroj protonů, kde je možno volit mezi dvěma již vytvořenými kyselinami nebo si definovat uživatelský zdroj, dále pak je možné nastavit dobu trvání a teplotu procesu protonové výměny.

Pokud uživateli nevyhovuje ani jeden z výše uvedených typů profilů vlnovodu, existuje možnost vytvořit si svůj uživatelský profil a to buď pomocí matematických výrazů a proměnných přímo vytvořených v Profile designeru nebo pomocí DLL knihoven zkompileovaných a vytvořených v jazyce C nebo C++, což vyžaduje hlubší znalosti programování v těchto jazycích. Optiwave uvádí, že pro správnou implementaci DLL knihovny je vhodné použít aplikaci Visual studio verze 6, avšak nevyklučuje ani jiná prostředí.

Pro usnadnění práce je vytvořena jedna univerzální DLL knihovna využívající externí textový RID soubor s popisem průběhu indexu lomu a konfiguračním souborem určujícím umístění RID souboru. Jelikož je DLL knihovna umístěna v instalačním adresáři OptiBPM a je k ní nutné zkopírovat konfigurační soubor s cestou k RID souboru, je potřeba mít administrátorská práva pro práci v operačním systému. Soubory RID lze vytvářet buď ručně anebo využít aplikaci *OWA convertor*, který vytváří RID soubory ze vstupních souborů získaných z měřicího přístroje EXFO OWA-9500, který provádí měření hodnot indexu lomu. Vytvořené RID soubory lze zobrazit v aplikaci Optiwave 3D Viewer, který je součástí OptiBPM.

Po uložení vytvořeného profilu nebo materiálu můžeme jeho ikonu jednoduše přetáhnout myší do stromové struktury s názvem *Master*, kde bude vytvořený profil či materiál k dispozici i při vytváření dalších nových projektů. Tato vlastnost značně ulehčuje a zrychluje tvorbu dalších profilů. Nyní je možné zavřít okno Profile designeru a vrátit se k počátečnímu dialogovému oknu nastavení waferu [11].

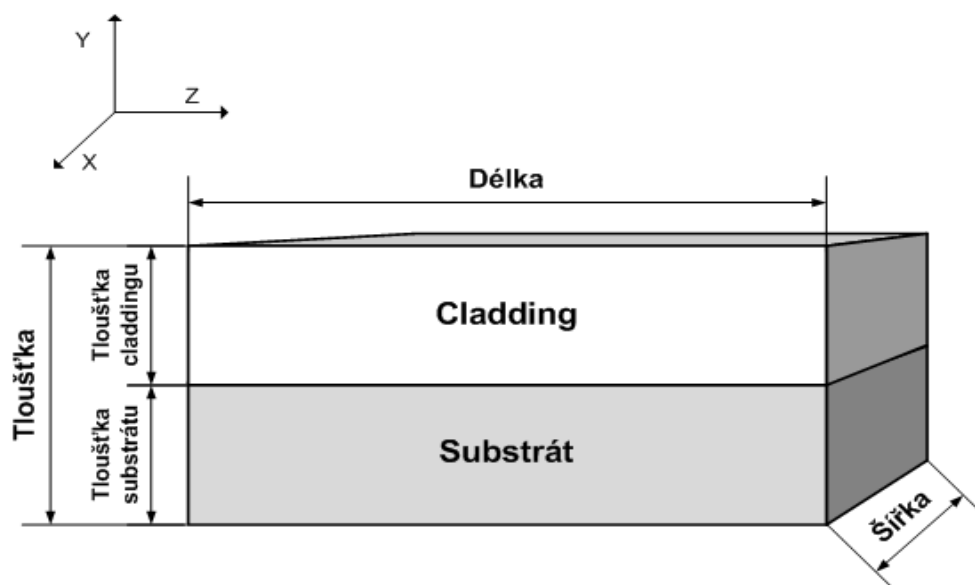
#### 4.3.2 OptiBPM Layout designer

V dialogovém oknu nastavení waferu v záložce *Default Waveguide* nyní můžeme z nabídky *Profile* vybrat námi vytvořený profil v Profile designeru. Můžeme také změnit výchozí šířku vlnovodu, která může být definovaná funkcí nebo proměnnou, převážná část hodnot určující rozměr případně i vlnovou délku se zapisuje v řádech  $\mu\text{m}$ , to může především při nastavování hodnoty vlnové délky vést k chybám, jelikož hodnoty vlnových délek se často zapisují v řádech nanometrů.

Přepnutím na záložku *Wafer Dimensions* nastavíme délku (*length*) a šířku (*width*) waferu.

V další záložce *2D Wafer Properties* zvolíme z jakého materiálu, který jsme vytvořili v Profile designeru, se bude *wafer* skládat. Z nabídky vybereme požadovaný materiál, případně jej vytvoříme v Profile designeru způsobem, který byl popsán v kapitole věnované OptiBPM Profile designeru, jelikož 2D režim pracuje jen s šířkou (osa X) a délkou (osa Z), nelze nastavit žádné rozměry, protože ty již byly nastaveny v předchozí záložce. V případě, že hodláme provádět pouze 2D simulace můžeme stisknutím tlačítka „OK“ dialogové okno zavřít. Pokud ovšem hodláme provádět 3D simulace musíme nastavit parametry v záložce *3D Wafer Properties*.

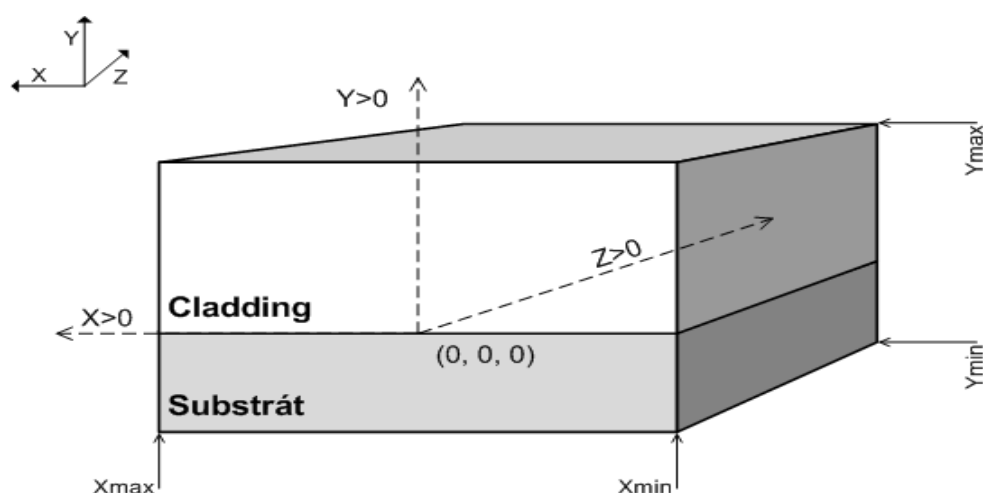
Budeme-li provádět jen 3D simulaci můžeme záložku *2D Wafer Properties* přeskočit, avšak je vhodné nastavit obě dvě. V 3D simulaci přibyl oproti 2D simulaci jeden rozměr a to hloubka/tloušťka (osa Y), v záložce nastavení waferu pro 3D simulaci je tedy nutné ji zadat. OptiBPM dělí wafer na dvě na sobě ležící části. Vrchní část tzv. *cladding* a dolní část tzv. substrát. Graficky je wafer vyobrazen na obr. 13. Vybereme materiál *claddingu* a substrátu a vložíme jejich rozměry.



Obr. 13: Grafické znázornění waferu.

Je nutné poznamenat, že počátek souřadnicového systému  $(0,0,0 - x,y,z)$  se nachází na rozhraní substrátu a claddingu pro osu Y a v polovině uvedené hodnoty šířky pro osu X. Například v případě, že šířka waferu je  $40 \mu\text{m}$ , bude maximální hodnota na ose X  $20 \mu\text{m}$  a minimální  $-20 \mu\text{m}$ .

Rozhraní mezi substrátem a claddingem má hodnotu osy Y vždy rovnu nule, je to tedy spodní část claddingu a horní část substrátu. Pro  $Y < 0$  platí pro oblast substrátu a  $Y > 0$  pro oblast claddingu. Nastavíme-li hodnoty šířky claddingu na  $17 \mu\text{m}$  a substrátu na  $15 \mu\text{m}$  bude maximální hodnota na ose Y rovna  $17 \mu\text{m}$  a minimální  $-15 \mu\text{m}$ . Vše názorně vyobrazuje obr. 14.



Obr. 14: Wafer a počátek souřadnicového systému.

Potvrzením vložených hodnot tlačítkem „OK“ se dialogové okno zavře a zobrazí se nám návrhové okno Layout designeru. To se skládá ze dvou základních částí, a to části pro tvorbu samotné navrhované součástky a části zobrazující upozornění a chybová hlášení. V horní části okna se nachází známá tlačítka pro práci s projektem jako je uložení projektu, kopírování, tisk a návrat zpět po provedené změně.

Následují tlačítka pro práci s projektem, jako je funkce lupy pro přibližování a oddalování návrhu. Dále pak tlačítka pro vytváření skriptů a jejich spouštění, tlačítka pro práci v režimu zobrazení indexu lomu a tlačítka pro výběr tvaru a typu kresleného vlnovodu. Rozložení skupin tlačítek je možné libovolně měnit, případně je skrývat. Tlačítka pro práci se zobrazením indexu lomu jsou aktivní jen v režimu zobrazení indexu lomu a tlačítka pro výběr typu kresleného vlnovodu jsou aktivní jen v návrhovém režimu.

Část určená pro tvorbu součástky obsahuje pět záložek – *Layout*, *Ref. Index view*, *Scripting*, *Notes* a *3D WG Viewer*:

- *layout* (návrhový režim) - v této záložce je zobrazen wafer při pohledu shora na rovinu XZ. Zakresluje se zde navrhovaná součástka,
- *ref. Index view* (režim zobrazení indexu lomu) - v tomto režimu je možné zobrazit průběh indexu lomu vytvořené součástky z transversálního pohledu na rovinu XY s možností posuvu podél osy Z, případně pohledu na rovinu XZ stejně jako v návrhovém režimu,
- *scripting* - záložka pro psaní skriptů ve *Visual Basic script* (VBScript),
- *notes* - záložka určená pro zápis poznámek,
- *3D WG Viewer* - 3D zobrazení návrhu. Tato funkce je dostupná od verze OptiBPM 10 a fungční jen pro typy profilů *Channel* a *Fiber* [11].

#### 4.3.3 Vlnovody v Layout designeru

V návrhovém režimu patří skupina *Waveguides* mezi nejdůležitější skupinu tlačítek tzv. toolbaru. Jednotlivá tlačítka na tomto toolbaru představují druh vlnovodu, který bude následně zakreslen do návrhu. K dispozici jsou tyto vlnovody:

- lineární – přímý vlnovod bez ohybu,
- obloukový – zakřivený obloukový vlnovod,
- eliptický – vlnovod ve tvaru elipsy,
- kružnice – vlnovod tvaru prstence,
- esovitý vlnovod – Vlnovod ve tvaru písmene „S“ OptiBPM nabízí tři druhy:

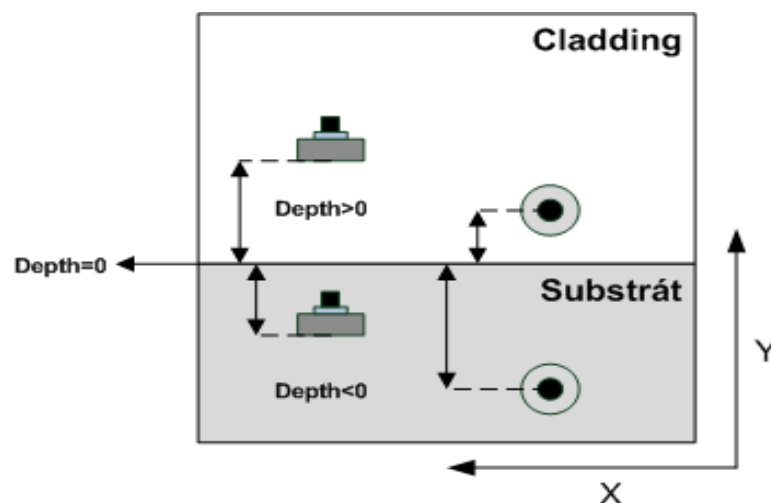
- obloukový,
  - sinový,
  - kosinový.
- lineární taper – přímý vlnovod s možností lineární změny šířky začátku a konce vlnovodu,
  - parabolický taper – obdoba lineárního taperu s parabolickým průběhem změny šířky,
  - exponenciální taper – obdoba lineárního taperu s exponenciálním průběhem změny šířky,
  - esovitý taper – Vlnovod ve tvaru písmene „S“ s lineární změnou jeho šířky. OptiBPM nabízí tři druhy:
    - obloukový taper,
    - sinový taper,
    - kosinový taper.
  - kruhová čočka,
  - eliptická čočka,
  - parabolická čočka,
  - hyperbolická čočka,
  - polynomiální vlnovod – vlnovod, jehož osa je definovaná polynomem až 10. řádu,
  - vlnovod definovaný funkcí – vlnovod, jehož tvar je definován matematickou funkcí.

Po výběru požadovaného tvaru vlnovodu se změní kurzor myši na kříž, pomocí kterého kliknutím a tažením myši zakreslíme vlnovod do návrhu. Nakreslený vlnovod lze dále upravovat pohybem myši zelenými body vytvořeného vlnovodu. Vlnovod kreslíme na rovinu XZ waferu, kde svislý směr odpovídá ose X a vodorovný ose Z.

Dvojklikem na vytvořený vlnovod se nám zobrazí jeho parametry, které můžeme změnit. Zde můžeme změnit pozici vlnovodu přesně tak, jak je potřeba, jelikož myši nejsme schopni zakreslit vlnovod s požadovanou přesností. Tato vlastnost je společná pro všechny vytvořené vlnovody. Většina vlnovodů má v tomto okně dvě záložky. První záložkou je záložka *Start* a skrývá se pod ní nastavení pozice začátku vlnovodu a další možnosti nastavení vlnovodu. Druhou záložkou je záložka *End* představující nastavení koncového bodu vlnovodu. Pro vlnovody typu elipsa, kružnice, kruhová čočka a eliptická čočka je k dispozici jen jedna záložka *Center* představující pozici středu vlnovodu. Pozici počátečního či koncového bodu vlnovodu nastavujeme ve dvou oddílech – horizontálním představující pohyb po ose Z a vertikálním představujícím pohyb po ose X. Do kolonky *expression* je možné zadat matematický výraz či proměnnou. Takto se dá měnit pozice jednotlivých vlnovodů změnou jediného parametru. Kolonky pro hodnoty, do kterých je možné



zapisovat proměnné a matematické výrazy, jsou vlevo označeny tlačítkem „fx“, po jehož stlačení je možné definovat globální proměnné a funkce. Do kolonky *offset* se číselně udává posun vůči hodnotě uvedené v kolonce *expression*. Pro jednoduchost stačí vyplnit jen kolonku *offset* s danou pozicí v jednotkách  $\mu\text{m}$  a kolonku *expression* nechat nevyplněnou. Pozici ve směru osy Y - hloubku - ve waferu udává kolonka *depth*. Je-li hodnota *depth* kladná je vlnovod umístěn v části waferu nazývané *cladding*, je-li záporná, je vlnovod umístěn v substrátu. Je třeba podotknout, že hloubka je definovaná jako vzdálenost mezi rozhraním *cladding/substrát* a středem profilu podél osy Y pro profil typu *fiber* vytvořeném v Profile designeru, nebo jako vzdálenost mezi rozhraním *cladding/substrát* a spodní částí profilu podél osy Y. Obr. 15 zobrazuje hloubku vlnovodu ve vztahu k typu profilu vlnovodu. Difundované profily mají fixní hodnotu  $\text{depth} = 0$  a šíří se do substrátu.



Obr. 15: Souřadnice hloubky vlnovodu[11].

Šířka vlnovodu se udává do kolonky *width* jedná se o rozměr ve směru osy X. Pokud vkládáme vlnovod typu taper zadáváme počáteční a koncovou šířku vlnovodu.

U všech vlnovodů je možné nastavit také tloušťku vlnovodu (podle osy Y). Tato možnost se skrývá pod skupinou s názvem *Channel Thickness Tapering*. Je-li zaškrtnuto políčko *Use Default* použije se výchozí nastavení profilu, které jsme zadali v Profile designeru. Odškrtnutím tohoto políčka se aktivuje možnost nastavení počáteční a koncové tloušťky a také možnost výběru průběhu změny tloušťky.

Posledními společnými nastavitelnými prvky jsou kolonka *Label* a nabídka *Profile*. *Label* definuje název vytvořeného vlnovodu. Tato kolonka má význam především při tvorbě projektů pomocí VBScriptu, pokud VBScript nevyužíváme, nemá prakticky žádný význam. Nastavujeme-li tuto kolonku ručně, musíme dodržet pravidlo, že každý vlnovod musí mít svůj jedinečný název,

jinak OptiBPM zobrazí chybové hlášení. Jednotlivé názvy se generují automaticky podle typu vlnovodu a pořadí v jakém byl daný typ vlnovodu vytvořen. Nabídka *Profile* nám umožňuje zvolit pro vlnovod typ profilu, který jsme vytvořili v Profile designeru, případně jej změnit za jiný profil v nabídce. V návrhu tedy může být i několik různých profilů. Typy použitých profilů vlnovodů, pro snadnější orientaci v návrhu, OptiBPM automaticky barevně odlišuje, případně lze k vybraným profilům ručně přiřadit barvu.

U vlastností vytvořených vlnovodů se dále nastavují parametry typické pro daný typ vlnovodu, jako jsou průměry ohybu, poloměry, úhly natočení a další, které jsou detailně popsány v příručce *OptiBPM User's Reference* [11] od strany 25.

U polynomiálního vlnovodu se zadávají hodnoty koeficientů  $a_0$  až  $a_{10}$  do rovnice (44), kde proměnná  $z$  představuje hodnotu vzdálenosti vlnovodu na ose  $Z$  waferu a proměnná  $x$  výslednou hodnotu ve směru osy  $X$ . Hodnota  $x_s$  je pozice začátku vlnovodu.

$$x(z) = x_s + a_0 + a_1 \cdot z + a_2 \cdot z^2 + \dots + a_{10} \cdot z^{10}. \quad (44)$$

Nastavení skupiny *Clipping* představuje omezení zadané funkce ve směru osy  $X$  shora – kolonka *Width (+)* – a vymezení zdola – kolonka *Width (-)*.

V případě, že z nějakého důvodu uživateli nevyhovují nabízené typy vlnovodů, nebo je vytvářený vlnovod příliš složitý, nabízí se možnost nadefinovat si svůj vlastní průběh vlnovodu. Tento typ vlnovodu nabízí široké možnosti nastavení a definování proměnných a konstant určujících průběh vlnovodu.

Nakreslení vlnovodu probíhá stejně jako u všech ostatních, dvojklikem na tento nakreslený vlnovod se zobrazí okno nastavení parametrů, které je zcela odlišné od předchozích vlnovodů. Vlevo v okně vlastností se přepínáme mezi jednotlivými nastaveními parametrů. Dole v okně vlastností se zobrazují proměnné, funkce a parametry, které jsou již definované. Pod *Waveguide Properties* se nastavují parametry známé již z předchozích typů vlnovodů, jsou to především pozice začátku a konce vlnovodu, nastavení šířky, hloubky, tloušťky, názvu a profilu vlnovodu.

V *Waveguide Function Definition* je možné vybrat ze dvou možností definice průběhu vlnovodu a to buď zadáním funkce osy vlnovodu pro případ je-li vlnovod symetrický podle osy  $X$  – *Path Defined* – nebo zadáním funkcí horního a dolního okraje vlnovodu – *Boundary Defined*. Podle výběru definice vlnovodu zadáme do kolonky *Function specification* název funkce s v závorkách uvedenými proměnnými. Do kolonky *Expression* uvedeme matematický výraz. Podporované výrazy nalezneme v příručce *OptiBPM User's Reference* [11] na straně 861. Syntaxi zadané funkce ověříme tlačítkem „Verify“ vpravo. Dole můžeme definovat definiční obor a obor hodnot zadané funkce. Pod kolonkami

pro zadání definičního oboru a oboru hodnot je možnost výběru zda je funkce definovaná v prostředí OptiBPM – možnost *Use parser definition* – nebo externě DLL knihovnou – *Use DLL Definition*. Definice okrajů vlnovodu je naprosto stejná, jen je rozdělená do dvou záložek. První je určená pro zadání funkce horního okraje a druhá pro zadání funkce dolního okraje. Definujeme-li funkci průběhu vlnovodu DLL knihovnou, zadáváme do kolonky *Function specification* název funkce a proměnné předávané DLL knihovně. Do kolonky *DLL file name* zadáváme cestu k samotnému DLL souboru.

Vybereme-li z nabídky vlevo v okně vlastností *Local Parameters*, máme možnost definovat proměnné, konstanty a funkce, případně je opět zadat pomocí DLL knihovny. Zde definované parametry jsou přístupné jen pro vybraný vlnovod, ostatní vlnovody tyto parametry neznají. Proměnné definujeme v záložce *User Variable*, kde do kolonky *Variable name* zadáme název proměnné a do kolonky *Expression* matematický výraz – pro případ proměnné – nebo číselnou hodnotu – pro případ konstanty. Ověříme syntaxi tlačítkem „*Verify*“ a tlačítkem „*Add*“ vytvoříme proměnnou. Dole v seznamu proměnných a funkcí nám v záložce *Local Variables* přibude nově definovaná proměnná. Vytvořenou proměnnou můžeme zpětně upravit jejím označením v seznamu proměnných změnou kolonky *Expression* a kliknutím na tlačítka „*Verify*“ a nakonec na „*Replace*“. Proměnné jde takto i odstranit jejím vybráním a kliknutím na tlačítko „*Remove*“. Definice funkcí v záložce *User Function* je obdobná definici průběhu funkce vlnovodu. Zadáme název funkce s vstupními proměnnými a její matematický výraz. I zde můžeme omezit obor hodnot funkce zaškrtnutím *Use limits* a zadáním limitů či funkcí představující limity. Funkci opět vložíme kliknutím na tlačítka „*Verify*“ a „*Add*“. Funkce lze rovněž upravovat stejným způsobem jako proměnné.

*Association Parameters* slouží k definování vztahů mezi lokálními a globálními parametry tohoto se využívá při práci s VBScriptem, když chceme upravovat parametry a proměnné vlnovodu.

*Associate Waveguide Function Arguments* slouží k definování vazeb argumentů použitých funkcí a lokálních proměnných a parametrů.

Vytvořené vlnovody je možné také různě kopírovat pomocí toolbaru *Flip and Mirror*, což usnadní práci a zkrátí čas zakreslování zejména tehdy, máme-li vytvářený vlnovod symetrický ve směru osy X či Z. [11]

#### 4.3.4 Vložení zdroje signálu

Po zakreslení všech vlnovodů do návrhu je potřeba vložit optický zdroj – *Input plane*. Zdroj je v návrhu zobrazen červenou čarou podél osy X. Místa na vlnovodech, které *Input plane* protne, můžeme zvolit jako zdroj signálu. Jeden *Input plane*, může tvořit vždy jen jeden zdroj signálu.

Dvojklikem na *Input plane* se zobrazí okno vlastností. Je možné nastavit pozici podél osy Z, stejně jak tomu bylo u vlnovodů. Dále je možné zvolit typ svazku a to módový, gaussovský, obdélníkový nebo definovaný externím souborem. Okno vlastností je rozděleno na záložky s nastavením pro zdroj signálu 2D a zdroj signálu 3D simulace, jelikož 2D a 3D simulace vyžadují různé nastavení *Input plane*. V každé záložce nastavení je seznam s vytvořenými zdroji pro daný typ simulace. Ze seznamu zvolíme zdroj jeho zaškrtnutím, vždy lze zvolit jen jeden. V případě, že jsme právě vložili *Input plane*, nemáme vytvořené žádné zdroje a seznam je tedy prázdný. Pro vytvoření zdroje, stiskneme tlačítko „Edit“. Zobrazí se nám okno rozdělené na dvě části. V pravé části jsou zobrazeny vlnovody, které protíná vybraný *Input plane*. Vybereme tedy požadovaný vlnovod zaškrtnutím a klikneme na tlačítko „Add“. V levé části se nám zobrazí vytvořený zdroj, vysílající signál do zvoleného vlnovodu. Zaškrtnutím vytvořeného zdroje a kliknutím na tlačítko „Edit“ můžeme nastavit amplitudu a fázi či náklon zdroje vzhledem k ose Z. Stiskem tlačítka „Mode“ vybráním zdroje a stiskem tlačítka „Calculate mode“ se nám zobrazí *Mode Solver 2D*, ve kterém se provede výpočet parametrů zdroje, které požaduje OptiBPM pro výpočet. Je zde možné nastavit typ simulace, počet vzorků a maximální počet módů, které má *mode solver* hledat. Zaškrtnutím vlnovodu a kliknutím na tlačítko „Calculate mode“ se přesuneme do záložky *Modes*, kde se nám zobrazí nalezené módy. Jejich zaškrtnutím se nám v grafu dole v okně zobrazí jejich průběh. Vše potvrdíme tlačítkem „Apply data“.

Vytvoření zdroje pro 3D simulaci je obdobné jako u 2D simulace. Nastavení se mírně liší, pomocí tlačítka „Mode“ zvolíme metodu výpočtu. Pokud máme profil typu *fiber*, můžeme zvolit kromě metody ADI i metodu *Fiber vector* či *Fiber LP*. V případě jiných profilů než je typ *fiber* musíme použít metodu ADI. Po stisknutí „Calculate mode“ se nám opět zobrazí další možnosti nastavení zdroje signálu. Stiskem „Calc. mode“ se zobrazí aplikace *M3Dsim* zobrazující výsledný průběh.

Pokud si zvolíme jiný typ zdroje než módový, máme v okně u výběru vlnovodu, kterým bude signál vstupovat do návrhu také aktivované tlačítko „User“, kde můžeme nastavit například výšku a šířku obdélníkového zdroje signálu či pozici středu gaussovského zdroje signálu a také náklon vzhledem k ose Z.

Nyní jsou provedeny veškeré nezbytné kroky pro spuštění simulace. OptiBPM ovšem nabízí širokou škálu dalších nastavení ovlivňující přesnost a rychlost simulace, vytvoření globálních proměnných, nastavení údajů, které se mají zobrazit po provedené simulaci a dále také možnost zobrazovat grafy průběhu indexu lomu návrhu bez toho aniž bychom museli spustit simulaci.[11]

#### 4.3.5 Další možnosti Layout designeru

Definicí globálních proměnných a funkcí, které jsou společné pro všechny vytvořené vlnovody, můžeme snadno a rychle měnit parametry návrhu. Jako například změna šířky vlnovodů či posuv vlnovodů. Definice parametrů se zobrazí volbou *Edit Parameters...* v nabídce *Simulation*. Vytváření globálních proměnných a funkcí je naprosto shodná s tvorbou lokálních proměnných, jejichž tvorba již byla popsána u vytváření uživatelsky definovaného vlnovodu. Vytvořené proměnné a funkce pak lze vkládat do kolonek nastavení parametrů, které podporují funkce a proměnné.

V nabídce *Simulation*, máme možnost také zvolit *Simulation Parameters...* a nastavit zde parametry simulace, jako je například vlnová délka, počet kroků při zobrazování průběhu simulace či volba zda se simulace bude provádět podle návrhu či podle vytvořeného skriptu. V záložce *2D* máme možnost nastavit parametry 2D simulace jako je například polarizace, způsob řešení pomocí BPM algoritmu a volba řádu Padého aproximace. Důležitým parametrem je *Propagation step*, který určuje vzdálenost mezi transversálními rovinami, ve kterých se provádí jednotlivé výpočty a dále také volba počtu výpočetních bodů v každé transversální rovině. Nastavují se zde také parametry hraničních podmínek. V záložce *3D Isotropic* provádíme nastavení 3D simulaci pro isotropní materiál i zde máme možnost volit polarizaci a krok simulace. Dále také počet výpočetních bodů ve směru X a ve směru Y. Záložka *3D Anisotropic* slouží k nastavení simulace pro anizotropní materiály.

Přidání dalších výstupních parametrů se provádí volbou *Additional output data* v nabídce *Simulation*. Máme možnost nastavit různé výstupní data pro různé simulace. Do simulace lze takto přidat zobrazení výkonu v závislosti na prošlé vzdálenosti ve vlnovodu, hodnoty výkonu na výstupech vlnovodů či nastavení řezů návrhem a zobrazením průběhu elektromagnetického pole či indexu lomu v těchto řezech.

V záložce *Ref. Index view* máme možnost zobrazit si průběh indexu lomu. Přepínání pohledů se provádí volbou tlačítka v toolbarech *Ref. Index view type* a *3D Graph*, které byly v režimu návrhu neaktivní. V toolbaru *3D Graph* máme možnost zapnout či vypnout zobrazení legendy a popisků os. Dále pak volit zobrazení 3D, ve kterém je možné s obrázkem pohybovat a různě rotovat nebo zvolit zobrazení 2D, kdy se zobrazí pouze pohled na rovinu XZ bez možnosti změny úhlu pohledu jak tomu je u 3D zobrazení. Další možností zobrazení průběhu indexu lomu je pomocí klasického spojnicového grafu zobrazující buď hodnoty v řezu roviny XY – pokud máme v toolbaru *Ref. Index view* zvoleno zobrazení na rovinu XY - podle nastavitelné osy Y nebo podle nastavitelné osy X a dále také s možností posuvu podél osy Z a vybírat takto transversální rovinu pro oba případy. Pokud máme zvolen pohled na rovinu XZ, pak máme možnost volby mezi spojnicovým grafem XZ s možností

pohybu podél osy Z nebo s možností pohybu podél osy X. Zbylé tlačítka v toolbaru *3D Graph* mají funkci lupy a pohybu ve zvětšeném průběhu indexu lomu.

Toolbar *Ref. Index view type* umožňuje zvolit pohled na průběh indexu lomu v transverzální rovině XY nebo XZ. Máme možnost přepínat mezi zobrazením reálné a imaginární složky indexu lomu. Dále máme možnost zobrazit pět tenzorů permitivity  $\epsilon_{XX}$ ,  $\epsilon_{XY}$ ,  $\epsilon_{YX}$ ,  $\epsilon_{YY}$  a  $\epsilon_{ZZ}$ .

Kliknutím pravým tlačítkem myši na graf máme možnost nastavit různé parametry grafu jako je zvětšení, změna typu grafu, změna hustoty mřížky, nastavení os a jejich názvů. Dále také nastavení barevné škály a její rozsahu a nastavení rozsahu hodnot indexu lomu.

V záložce *3D WG viewer* máme možnost zobrazit vytvořený vlnovod v 3D pohledu a různě s ním pohybovat a přibližovat jej. Tato funkce ovšem pracuje jen za podmínky použití profilu typu *fiber* či *channel*. Uživatelsky vytvořené profily nejsou touto funkcí podporovány.

Dále máme také možnost v toolbaru *Scripting* vygenerovat VBScript popisující vytvořený návrh. Pokud tento vytvořený skript zkopírujeme a vložíme do nově vytvořeného projektu a následně jej spustíme, vytvoří se nám původní návrh, pro který byl tento skript vytvořen. Máme také možnost vytvořit tzv. *Scanning data script* umožňující postupně měnit vlnovou délku vybraného zdroje *Input plane* v nastavitelném rozmezí vlnových délek (v jednotkách  $\mu\text{m}$ ) a počet kroků. Nastavíme-li vlnové délky například na rozsah 1,4-1,5  $\mu\text{m}$  a chceme krok každých 0,01  $\mu\text{m}$  nastavíme krok na 11, jelikož je zahrnuta i počáteční vlnová délka 1,4  $\mu\text{m}$ . Pro využití tohoto skriptu je nutné v nastavení simulace mít zvoleno *Simulate Using Script*. V případě chceme-li exportovat výsledná data například do aplikace Optisystem je potřeba mít zaškrtnuto i pole *Simulation generates scattering data information*. Je také nutné dodat, že simulace poběží déle o násobek počtu zvolených kroků [11].

#### 4.4 Simulace v prostředí OptiBPM

Simulace v OptiBPM se spouští volbou typu simulace z nabídky *Simulation*. Zobrazí se nám okno s možností nastavení parametrů simulace. Stisknutím tlačítka „Run...“ se spustí samotná simulace. Zobrazí se okno aplikace *OptiBPM Simulator*, ve kterém se zobrazuje průběh výpočtu simulace, chyby ve výpočtu a průběžné výsledky. Po dokončení simulace je vytvořen soubor s výsledky simulace „\*.bpa“ a ten je zobrazen aplikací *OptiBPM Analyzer*. Tento soubor lze opakovaně spouštět, aniž by bylo nutné spouštět mnohdy časově náročnou simulaci a ušetřit takto velké množství času.

#### 4.4.1 OptiBPM Analyzer

Aplikace *OptiBPM Analyzer* slouží k zobrazování, vyhodnocování a zpracování výsledků provedených simulací navrženého projektu v OptiBPM Layout designeru. Aplikace opět dělí do třech částí. První částí je část *Analysis tools* s přehlednou stromovou nabídkou výsledků odsimulovaných dat. Další důležitou částí je část zobrazující výsledky a grafy simulace. Třetí částí je okno sloužící k výpisu chybových hlášek a upozornění.

Z nabídky *Export* lze exportovat vybraná výsledná data a následně si je prohlížet v aplikaci *Optiwave 3D viewer* nebo *Optiwave 2D viewer*. Většina tlačítek a nastavení grafů v OptiBPM Analyzeru jsou stejná jako v Layout designeru. Přibyla zde jen nabídka *Iteration*, která je aktivní v případě, že proběhla více než jedna simulace stejného návrhu. Například při simulaci reakce návrhu na změnu vlnové délky, každá položka v této nabídce pak odpovídá jedné hodnotě vlnové délky.[11]

#### 4.5 Tvorba skriptů pro simulaci

Pro usnadnění a rychlejší tvorbu návrhů v OptiBPM lze použít skriptovacího jazyka *VBScript*, který je implementován přímo do prostředí OptiBPM v Layout designeru pod záložkou *Scripting*. Pomocí vytvářených skriptů lze vkládat jednotlivé komponenty a nahradit tak způsob vytváření projektu pomocí myši. Pomocí VBScriptu jsme schopni snadno měnit veškeré parametry návrhu a odbourat tak zdlouhavé a opakující se úkoly. *VBScript* lze využít nejen k tvorbě návrhu, ale i k spouštění simulací. Pomocí cyklů jsme například schopni postupně upravovat parametry návrhu, parametry simulace a spustit samotnou simulaci. Díky tomu můžeme v OptiBPM Analyzeru jednoduše sledovat reakce výsledných hodnot na provedené změny.

Jak již bylo popsáno v závěru kapitoly věnované Layout designeru je možné pomocí tlačítek toolbaru *Scripting* vytvářet skripty pro již vytvořený návrh.

- *Run* – spouští vytvořené skripty,
- *template script* – vytváří skript popisující již zakreslené vlnovody, jejichž názvy jsou dynamicky generovány funkcí „*WGMgr.FindID(“”*)“,
- *layout script* – má stejnou funkci jako *Template script*, hlavním rozdílem je způsob pojmenování vlnovodů, který není dynamický. Názvy vlnovodů jsou pak shodné s názvy nastavených v kolonkách *label* u vlastností vlnovodů. Na začátku skriptu dojde k smazání všech konstrukcí a proměnných, které byly doposud vytvořeny,

- *scanning script* – vytvoří základní strukturu skriptu umožňující pomocí cyklu krokově měnit hodnoty parametrů a spouštět simulaci,
- *scattering data script* – umožňuje vytvořit základní konstrukci skriptu, který je určen k provádění simulací s postupnou změnou vlnové délky vybrané *Input plane*. Výsledné data této simulace lze exportovat do aplikace OptiSystem a vytvořit tak novou komponentu představující simulovaný návrh v OptiBPM [13].

#### 4.5.1 Základní konstrukce jazyka

Proměnné, které zastupují i objekty se vytvářejí:

*Dim promenna*

Následně se k proměnné přiřadí její hodnota nebo ukazatel na objekt. Proměnné mohou být buď celočíselné (*integer*) či s pohyblivou desetinnou čárkou (*float*), textové (*string*), boolovské nebo jako ukazatele na objekt.

Proměnné lze dále přetypovávat na jiné datové typy:

*CInt(výraz)* – přetypování na 2 bytový Integer

*CLng(výraz)* – přetypování na 4 bytový Integer

*CSng(výraz)* – přetypování na 4 bytový Float

*Cdbl(výraz)* – přetypování na 8 bytový Float

*CStr(výraz)* – přetypování na String

Dalšími důležitými stavebními prvky jsou cykly typu *for* a podmínky typu *if*.

***For counter= start To end Step krok***

*Výraz*

***Next***

*Start* udává číselnou proměnnou či jen číslo, od kterého smyčka odstartuje. Po dosažení proměnné či číselné hodnoty udané v *end* se cyklus ukončí. Část *Step* udávající krok, po kterém se bude zvyšovat hodnota proměnné je nepovinná.

***If podmínka then***

*Výraz*

***ElseIf podmínka2 Then***

*Výraz*



***Else***

*Výraz*

***End If***

Podmínka uvedená v konstrukci musí mít výslednou hodnotu pravda/nepravda (*true/false*). Pomocí *ElseIf* lze vytvářet konstrukce vícenásobných podmínek.[13]

#### 4.5.2 Základní prvky pro práci s objekty

VBScript v OptiBPM poskytuje několik základních objektů sloužících pro samotnou tvorbu návrhu v OptiBPM, které jsou vždy přístupny. Jedná se hlavně o tyto:

- *waveguide manager* - slouží pro vytváření objektů a nastavování jejich parametrů,
- *parameter manager* – nastavuje hodnoty proměnných a stará se o vykonávání simulace,
- *input plane manager* – Má na starosti vytvoření a manipulaci s parametry *Input plane*.

Pomocí Waveguide manageru můžeme vytvářet nové objekty v návrhu a dále můžeme upravovat jednotlivé atributy již vytvořených objektů.

Příklad vytvoření lineárního vlnovodu dlouhého 200  $\mu\text{m}$  jdoucího po ose Z:

*WGMgr.DeleteAll*

*Dim Linear1*

*Set Linear1 = WGMgr.CreateObj ( "WGLinear", "Linear1" )*

*Linear1.SetPosition -0, 0, 200, 0*

*Linear1.SetAttr "WidthExpr", "4.0"*

Natavení atributu vlnovodu se provádí pomocí příkazu složeného z proměnné, která slouží jako ukazatel na daný objekt, dále pak příkazem *SetAttr*. Následuje název nastavovaného atributu v uvozovkách a nakonec v uvozovkách uvedená hodnota atributu oddělena od názvu atributu čárkou. Jednotlivé názvy atributů jsou uvedeny v *OptiBPM 10.0 VBScripting Reference* [13] od strany 17.

*Parameter manager* slouží k nastavování hodnot jednotlivých globálních proměnných. Dále také provádí kontrolu skriptu před jeho samotným spuštěním v simulaci. Základní konstrukce pro nastavení parametru

*ParamMgr.SetParam ("navez\_parametru", "hodnota")*

Pomocí cyklů typu *for*, nastavováním proměnných a hodnot atributů během tohoto cyklu lze snadno vytvářet simulace zobrazující závislost na měněném parametru. Přidáním příkazu:

*WGMgr.Sleep(time).*

A jeho přidáním do smyčky typu *for*, dosáhneme zpoždění každého průchodu cyklem právě o hodnotu proměnné *time* udávané v jednotkách milisekund. Dosazením hodnoty přibližně 100ms a spuštěním skriptu tlačítkem „Run“ v Layout designeru můžeme vidět průběžnou změnu návrhu v čase jako animaci.

Při používání cyklů bychom měli zohlednit výpočetní výkon počítače. Jelikož s rostoucím počtem kroků a především pak s rostoucím počtem cyklů vnořených do jiných cyklů velmi roste náročnost simulace a prodlužuje se tak i výpočetní čas [13].

## 4.6 Vytvoření komponenty pro prostředí OptiSystem

Výsledky simulace lze exportovat z OptiBPM Analyzeru do softwaru OptiSystem, který slouží k provádění simulací vytvořených optických tras z jednotlivých stavebních prvků optické trasy. Pro export vytvořené komponenty je potřeba provést simulaci pro více hodnot vlnových délek. Nejjednodušším řešením je použití VBScriptu pomocí tlačítka „*Scanning data script*“ pro povolení exportu je potřeba mít zaškrtnuto pole *Simulation generates scattering data information* v nastavení simulace. OptiSystem vyžaduje mít odsimulovaná data alespoň pro tři různé vlnové délky.

Samotný export dat se provádí volbou *Scattering Data in Cartesian Coordinates* pro export dat v kartézském souřadnicovém systému anebo volbou *Scattering Data in Polar Coordinates* pro export dat v polárním souřadnicovém systému z nabídky Export v OptiBPM Analyzeru. Exportovaný „\*.s“ datový soubor pojmenujeme a uložíme.

V OptiSystemu vytvoříme nový projekt a vložíme komponentu *OptiBPM Component NxM*. Po vložení komponenty si otevřeme její vlastnosti dvojklikem na její ikonu. V záložce *Main*, vybereme z roletové nabídky *File format* typ dat. Pokud jsme exportovali data v kartézské soustavě souřadnic, zvolíme položku *Real Imag*, pokud jsme data exportovali v polární soustavě souřadnic, zvolíme položku *Amplitude phase*. Dále do kolonky *Filename (.s)*, vložíme cestu ke zdrojovému souboru. Nyní máme komponentu připravenou k simulaci v aplikaci OptiSystem. Na vytvořené komponentě se automaticky upravil počet vstupů a výstupů podle návrhu v OptiBPM. Vstupy na komponentě jsou označeny šipkou jdoucí dovnitř komponenty a výstupy označuje šipka jdoucí ven z komponenty [14].

## 4.7 Návrh OVČ 01x02 50/50 FBT

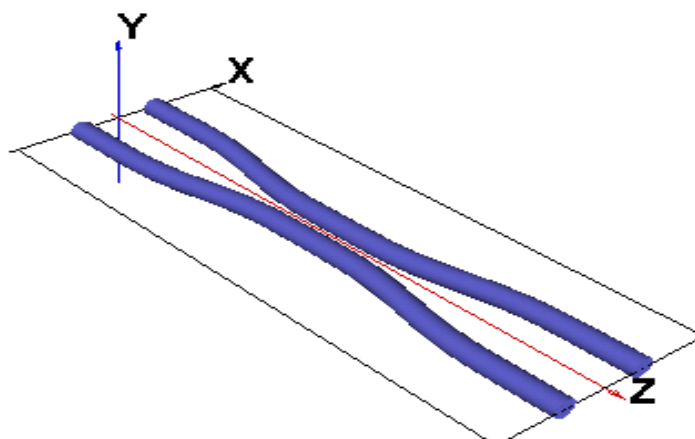
V počátcích návrhu, kdy nebyly doposud známy rozměry požadovaného OVČ byly prováděny návrhy a simulace ověřující teoretické poznatky o vlivu změny některých parametrů na rozložení

elektromagnetického pole OVČ, uvedené v kapitole 2.1 zabývající se matematickým a fyzikálním popisem funkce OVČ. Jedná se především o změnu délky vazební oblasti, změnu průměru jádra vláken, změnu vlnové délky signálu vstupujícího do OVČ a změnu vzdálenosti os jader vláken ve vazební oblasti. Ke každé simulaci je přiložen graf znázorňující reakci vazebního koeficientu na měněnou veličinu. Hodnoty v grafech mají znázorňovat způsob reakce vazebního koeficientu na změnu proměnné. Hodnoty jsou vypočtené pomocí vzorce (16) pro vlnovou délku 1370 nm, efektivní index lomu 1,4535. Tento návrh OVČ je možné principiálně přirovnat k OVČ vytvořeným technologií FBT nikoliv však rozměrově. Jelikož se jedná o dvě stejná vlákna, bude rozdíl jejich konstant šíření roven 0.

V příloze k této diplomové práci jsou uvedeny použité skripty pro provádění simulace reakce návrhu na jeho změnu. Jedná se o upravené skripty, které byly vytvořeny pomocí funkce tlačítka „Layout Script“ a „Scattering Data Script“.

#### 4.7.1 Parametry návrhu

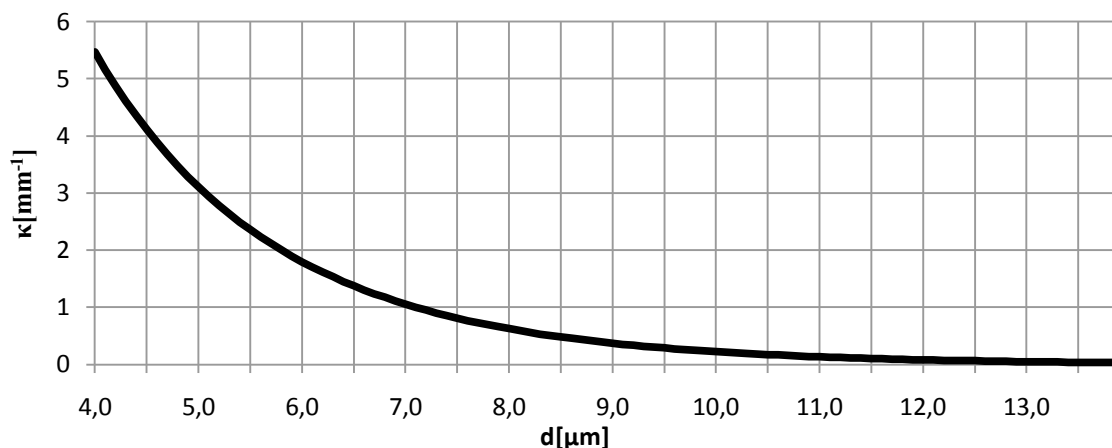
Jedná se o návrh s indexy lomu vlnovodu 1.457 a waferu 1,45 (NA = 0,143), který obklopuje vlnovod ze všech stran. Vlnovod má v Profile designeru vytvořený profil typu *fiber* ve tvaru kruhu o průměru 4  $\mu\text{m}$ , tak aby odpovídal kruhovému profilům vláken, které se používají ve výrobě, kdy při procesu FBT dojde k jejich zúžení. Rozměry waferu jsou 40x32x1000  $\mu\text{m}$ . Vzdálenost os jader vláken ve vazební oblasti je 6  $\mu\text{m}$ . Díky malým rozměrům návrhu není simulace výpočetně a tedy ani časově náročná i při použití dlouhých cyklů typu *for* ve vytvořených skriptech. Vytvořený OVČ je zobrazen na obr. 16. Tento návrh slouží jen k ověření teoretických předpokladů a nelze jej srovnávat se skutečnými OVČ.



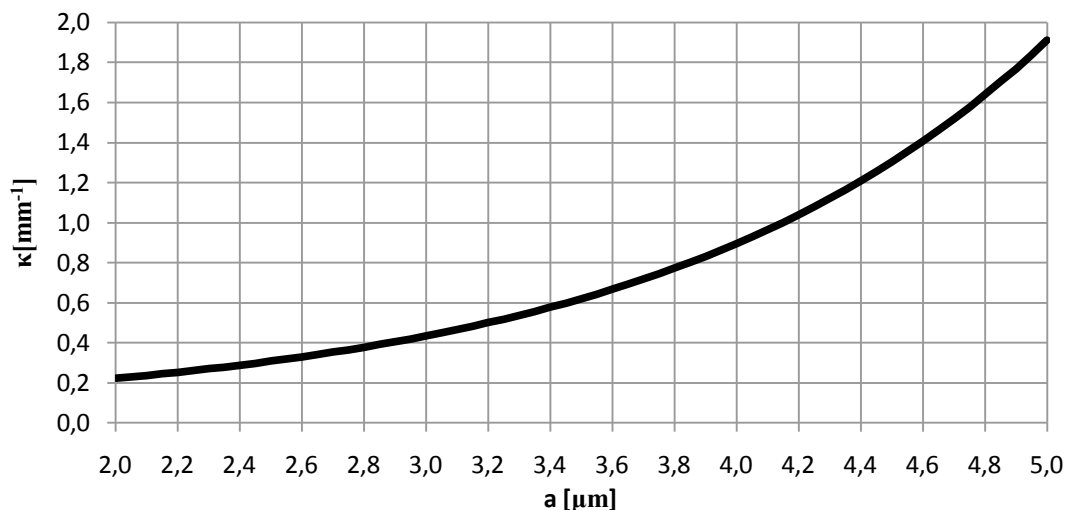
Obr. 16: Náhled OVČ v 3D WG Vieweru.

#### 4.7.2 Simulace vzdalování os vláken a změny poloměru jádra vláken

V této simulaci bude probíhat vzájemné vzdalování os vláken ve vazební oblasti a v další simulaci pak zvětšování poloměru jádra vláken. Z grafu funkce (16) uvedeném na obr. 17 a obr. 18 vyplývá, že koeficient vazby by měl s rostoucí vzdáleností os jader vláken klesat případně s rostoucím poloměrem jader vláken růst.



Obr. 17: Graf závislosti vazebního koeficientu na vzdálenosti os vláken.



Obr. 18: Graf závislosti vazebního koeficientu na poloměru jádra vláken.

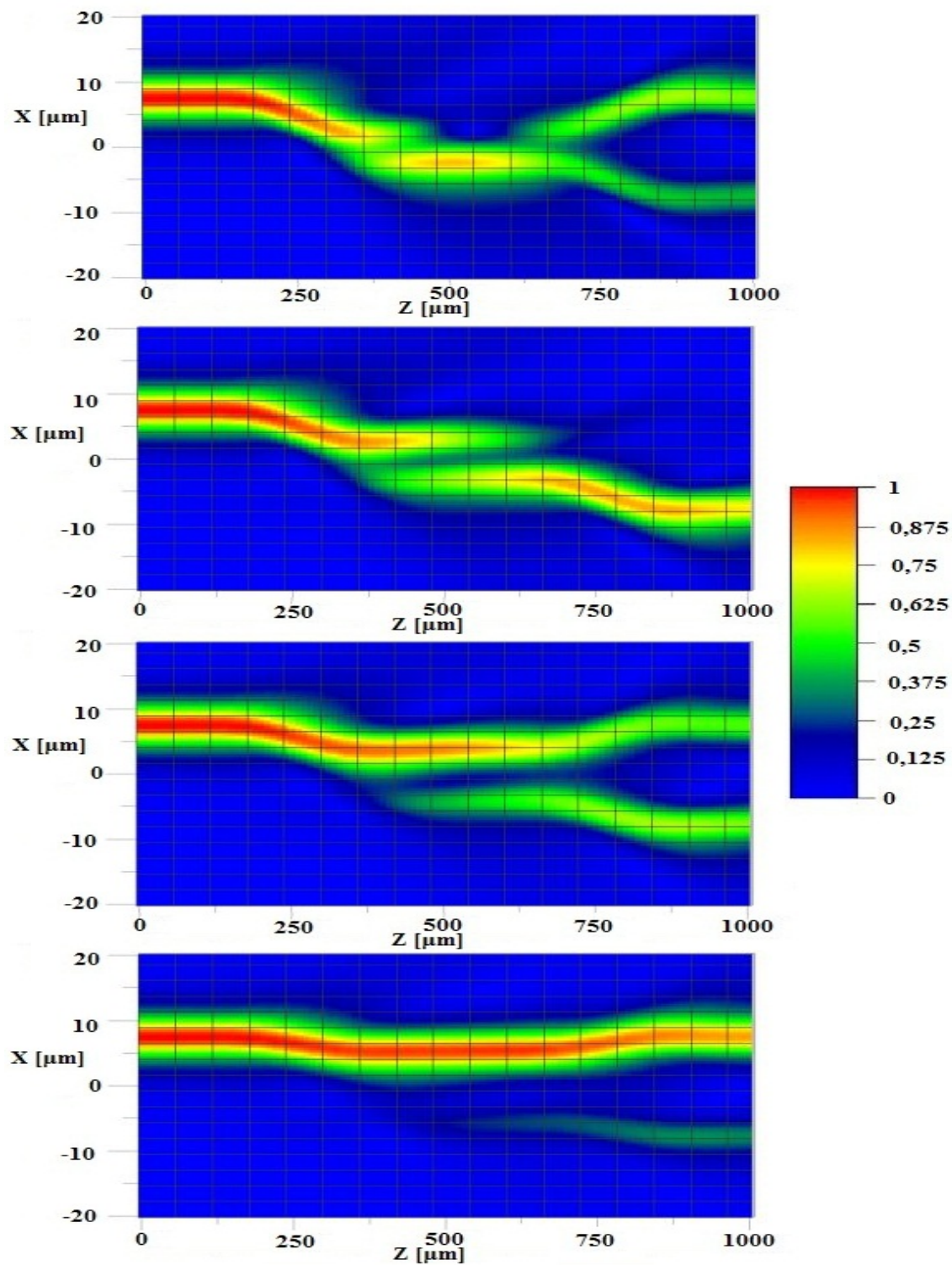
Aby byly výsledné hodnoty pro případ rozšiřování jádra vlákna správné, změnila se vzdálenost os jader vláken z původních 6 μm na 10 μm, z důvodu zabránění překrytí vlnovodů při větší hodnotě průměru jádra vláken.

Ze vzorců (11) a (12) je možné usoudit, že s klesajícím koeficientem vazby se bude prodlužovat perioda funkce, pak pro zachování konstantního přenosu výkonu bude potřeba větší délka vazební

oblasti. Jelikož je v této simulaci délka vazební oblasti konstantní, bude hodnota výkonu přeneseného z prvního vlákna do druhého klesat s rostoucí vzdáleností os vláken nebo růst s rostoucím poloměrem jader vláken.

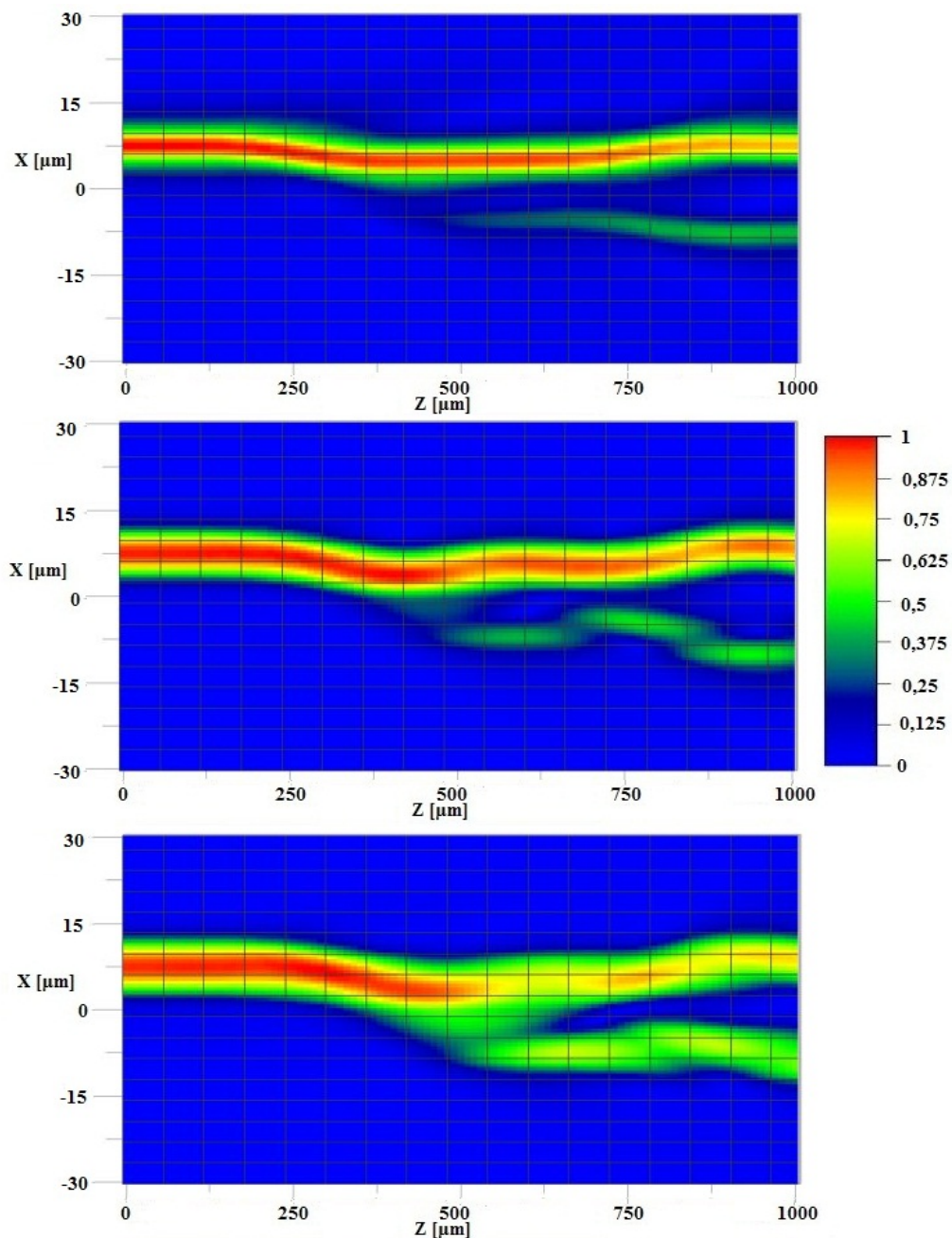
Simulace vzdalování os jader vláken potvrzuje očekávané teoretické výsledky a to, že bude klesat hodnota koeficientu vazby. Výsledek simulace pro čtyři různé vzdálenosti os jader vláken jsou uvedeny na obr. 19. Simulace byla prováděna při konstantní vlnové délce 1370 nm.

Na prvním ze čtveřice grafů lze vidět, jak nejprve přechází veškerý výkon do jádra druhého vlákna a poté se vrací zpět. Jelikož není vazební oblast dosti dlouhá nebo také koeficient vazby dosti vysoký nepřejde všechnen výkon zpět do prvního vlákna. Na druhém obrázku lze vidět, že již nedojde k přenosu výkonu zpět do prvního vlákna. To je dáno tím, že s rostoucí vzdáleností os jader vláken poklesl vazební koeficient. Třetí obrázek zobrazuje rozložení elektromagnetického pole, kdy vazební koeficient poklesl na takovou hodnotu, takže se do druhého vlákna jedna přenáší polovina výkonu, druhá polovina zůstává v prvním vlákně. Poslední obrázek znázorňuje situaci, kdy hodnota koeficientu vazby je natolik malá, že se již nepřenáší téměř žádný výkon do druhého vlákna. Většina výkonu, který vstupuje do OVČ zůstává v prvním vlákně.



Obr. 19: Graf závislosti intenzity elektromagnetického pole na vzdálenosti vláken.

Na obr. 20 je vidět reakci rozložení intenzity elektromagnetického pole na změnu šířky jádra vlnovodu. Z průběhu grafu na obr. 18 je vidět, že změna poloměru jádra má také velký vliv na koeficient vazby. Obdobně jako změna vzdálenosti os jader vláken. Toto potvrdil i výsledek simulace, kdy s nárůstem poloměru jádra vlákna roste vazební koeficient a tedy i výkon přenesený do druhého vlákna, kde na třetím snímku je vlnovod s dvojnásobným poloměrem jádra než na prvním snímku.

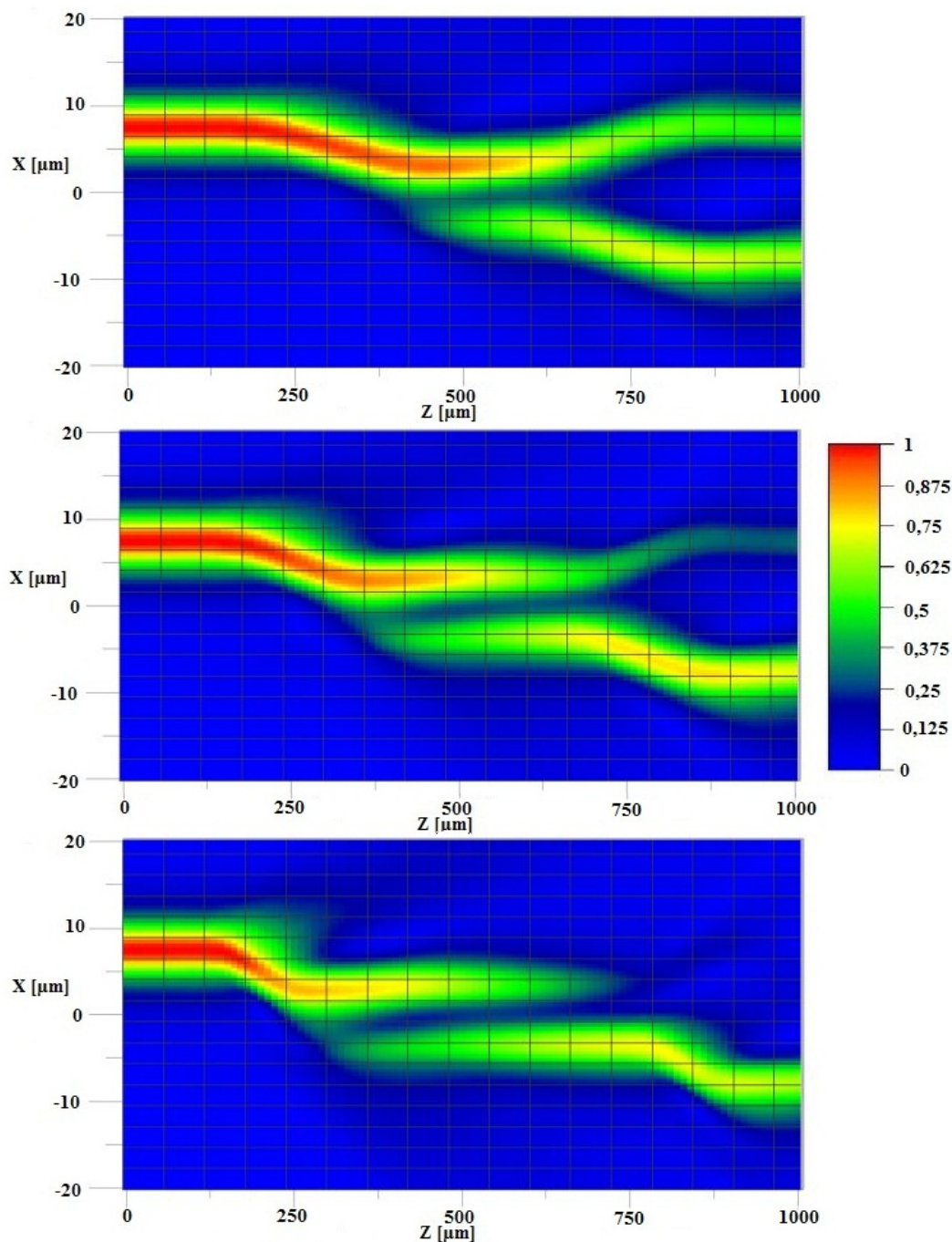


Obr. 20: Graf závislosti intenzity elektromagnetického pole na poloměru jader vláken.



#### 4.7.3 Simulace prodlužování vazební oblasti

Změna délky vazební oblasti nemá vliv na hodnotu vazebního koeficientu. Ale podle vzorců (11) a (12) bude mít vliv na přenos výkonu mezi vlákny a tedy se jím dá snadno řídit dělicí poměr OVČ výběrem vhodné délky vazební oblasti. Při velké délce vazební oblasti se můžou maxima výkonu mezi vlákny několikrát vystřídat.



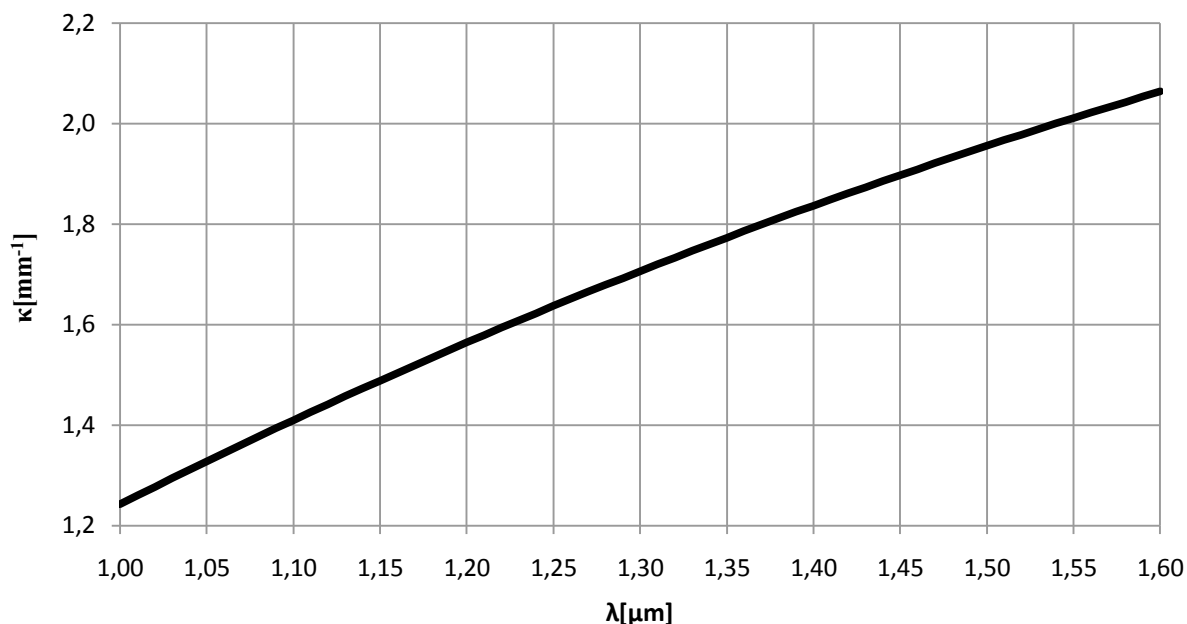
Obr. 21: Graf závislosti intenzity elektromagnetického pole na prodlužování vazební oblasti.



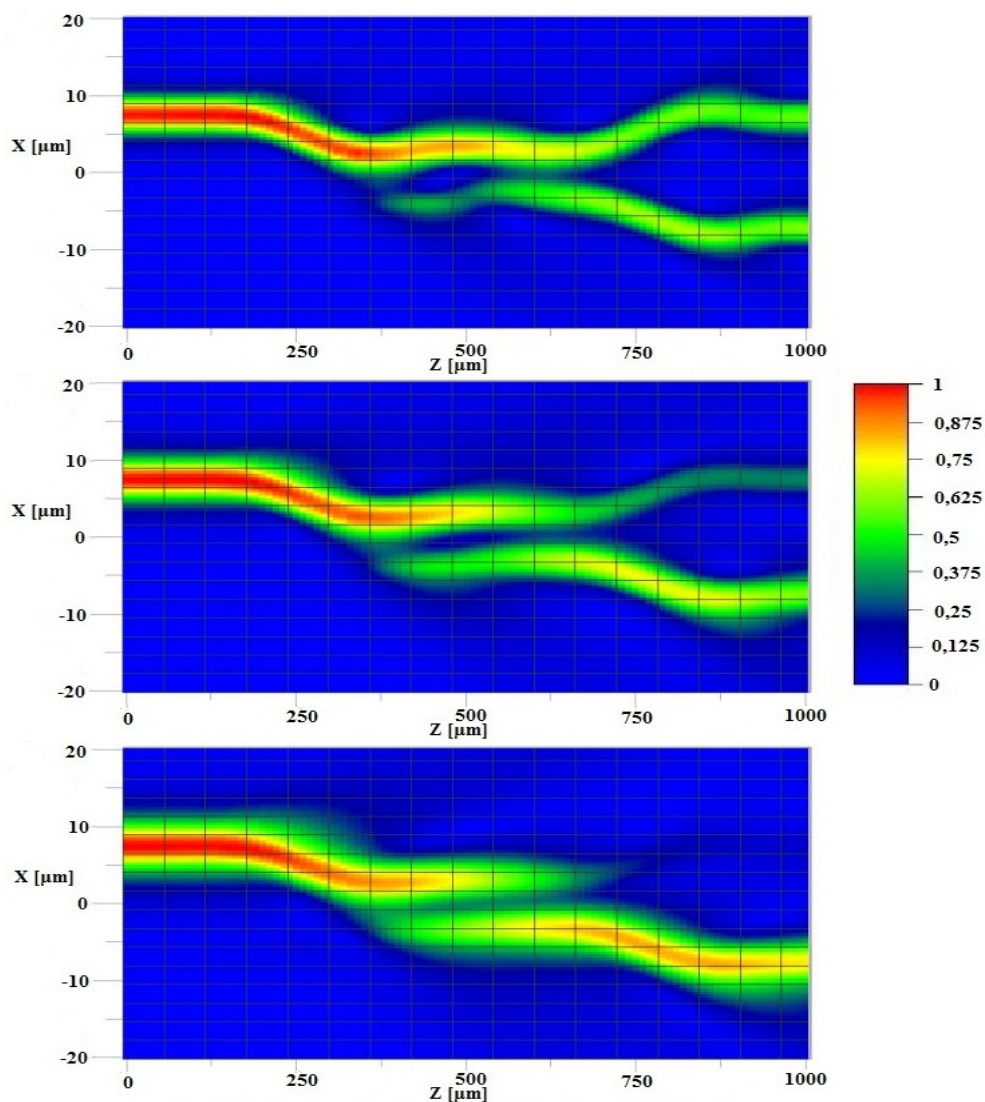
Z obr. 21 na prvním snímku vidíme, že intenzity elektromagnetického pole jsou téměř shodné. Druhý snímek znázorňuje situaci, kdy je délka vazební oblasti již tak velká že větší část výkonu přejde do druhého vlákna. Poslední snímek vykresluje situaci, kdy je délka vazební oblasti již tak velká, že veškerý výkon přešel z prvního vlákna do druhého.

#### 4.7.4 Simulace změny vlnové délky

Tato simulace se bude zabývat vlivem změny vlnové délky na přenesený výkon a tedy i velikost vazebního koeficientu. Jelikož má vlnová délka vliv na normalizovanou frekvenci podle nepřímé úměry, pak s rostoucí vlnovou délkou, klesá hodnota normalizované frekvence, díky čemuž roste velikost vazebního koeficientu podle grafu funkce na obr. 22. Simulace je prováděna pro velký rozsah vlnových délek (1000 nm-1600 nm), aby byla změna patrná.



Obr. 22: Graf závislosti vazebního koeficientu na vlnové délce.

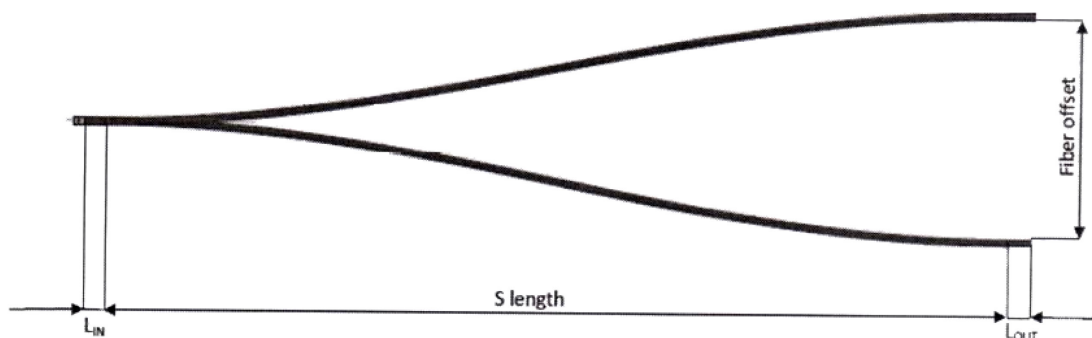


Obr. 23: Graf závislosti intenzity elektromagnetického pole na vlnové délce.

Z výsledků simulace zobrazených na obr. 23 jasně vidíme závislost rozložení elektromagnetického pole v navrženém OVČ. Je vidět, jak s nárůstem vlnové délky přechází výkon z horní větve do dolní, což je dáno rostoucí hodnotou koeficientu vazby.

#### 4.8 Návrh OVČ 01x02 50/50 PLC

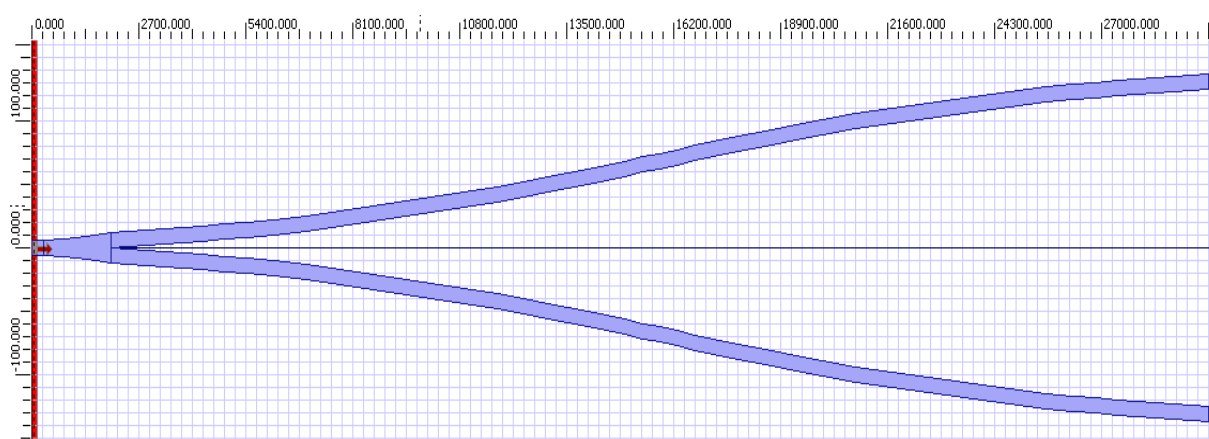
Zadání OVČ je převzato od firmy SQS Vláknová optika a. s., požadovaný tvar je na obr. 24. Jedná se o vlnovod vytvořený pomocí difuze, maximální celková délka je 30 mm, délky  $L_{IN}$  a  $L_{OUT}$  jsou 300  $\mu\text{m}$ . Rozestup vnitřních okrajů výstupních vlnovodů je 250  $\mu\text{m}$ . Navržený vlnovod je uveden na obr. 25.



Obr. 24: Zadání požadovaného tvaru OVČ.

Profil vlnovodu je tvořen difuzí titanu do substrátu z lithiurniobátu, nad kterým je vzduch s indexem lomu  $n=1$ . Uvedené materiály jsou v OptiBPM přednastaveny jako výchozí, tudíž nebylo třeba hledat hodnoty elektrooptických materiálů v tabulkách, hodnota indexu lomu je určována automaticky Sellmeierovými rovnicemi. Hodnota dopačnické konstanty je nastavena na  $5,67 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ . Tloušťka pásu difundovaného materiálu před difuzí je  $0,5 \mu\text{m}$ , šířka difundované oblasti byla nastavena na  $12 \mu\text{m}$  a hloubka na  $4 \mu\text{m}$ . Distribuční konstanta a hodnota mocniny gamma byly ponechány na výchozích hodnotách. Průběh indexu lomu je na obr. 26.

Rozměry waferu jsou  $500 \times 70 \times 30000 \mu\text{m}$ . Šířka všech vlnovodů je defaultně nastavena na  $12 \mu\text{m}$ . Vstupy a výstupy jsou opatřeny lineárními vlnovody o délce  $300 \mu\text{m}$ . Za lineárním vlnovodem na vstupu je umístěn vlnovod definovaný pomocí funkce ve tvaru taperu délky  $1700 \mu\text{m}$  rozšiřující se z  $12 \mu\text{m}$  na  $24 \mu\text{m}$ . Taper je zadán pomocí definování jeho horního a dolního okraje – *Boundary defined*.



Obr. 25: Navržený OVČ v aplikaci OptiBPM.

Horní hranice taperu:

$$x = 6 + \frac{6 \cdot z^{1,5}}{1700^{1,5}}. \quad (45)$$

Dolní hranice taperu

$$x = -6 - \frac{6 \cdot z^{1,5}}{1700^{1,5}}. \quad (46)$$

Za taperem následují vlnovody délky 27700  $\mu\text{m}$ , které se od sebe vzájemně vzdalují, až do vzdálenosti 250  $\mu\text{m}$  od okrajů vlnovodů. Tyto dva vlnovody jsou popsány funkcemi

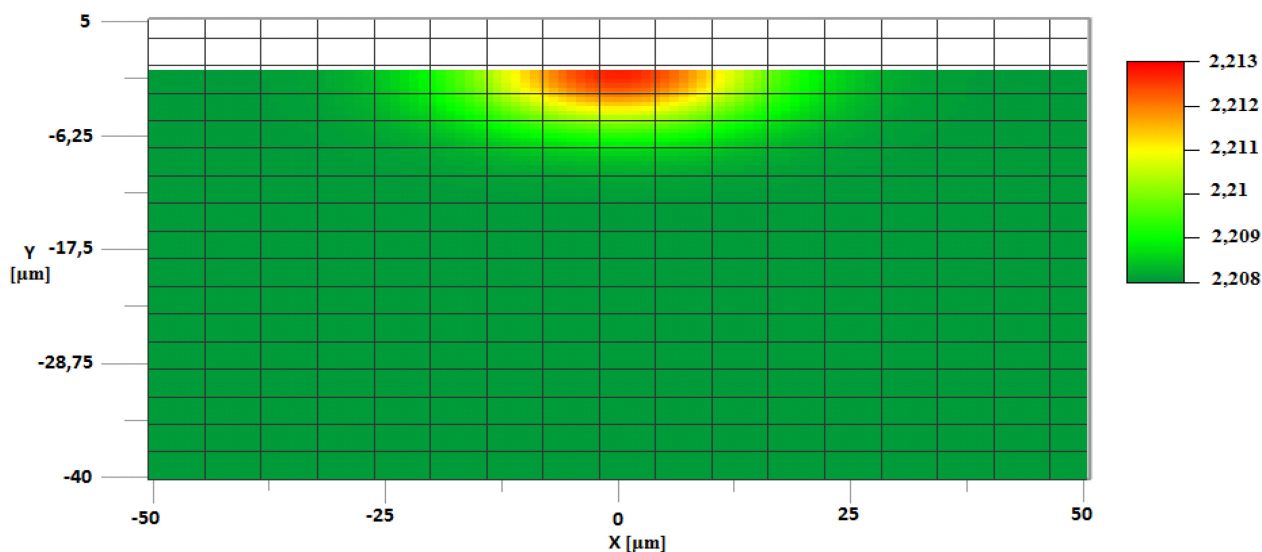
$$x = -10 * \sin\left(\frac{z}{27700} \frac{\pi}{2}\right) \quad (47)$$

a

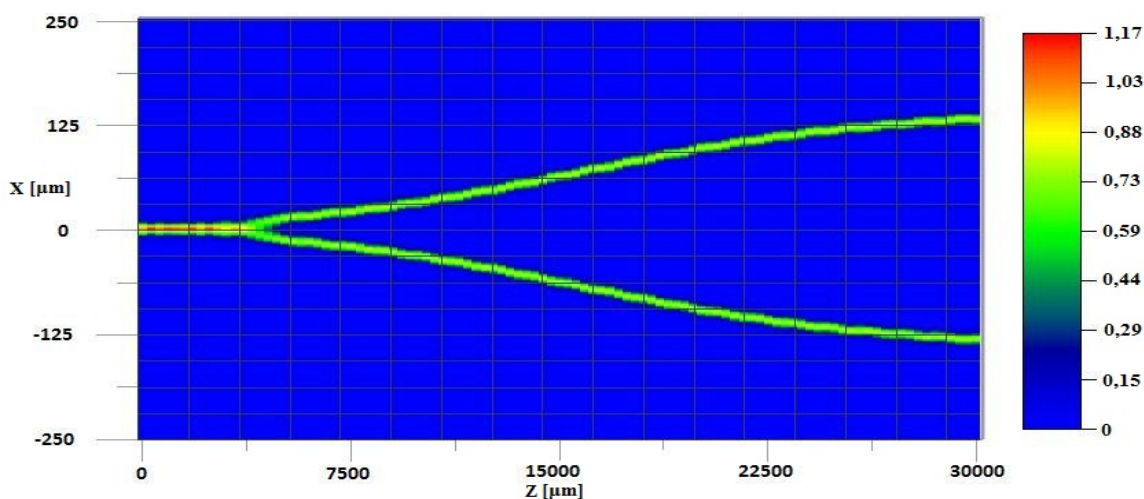
$$x = 10 * \sin\left(\frac{z}{27700} \frac{\pi}{2}\right). \quad (48)$$

Pro simulaci byla zvolena Padého aproximace 4. řádu, prováděná metodou konečných diferencí s krokem 1,55  $\mu\text{m}$ . Směr polarizace byl ponechán na TE. Okrajová podmínka výpočetního okna byla zvolena typu PML s šesti vrstvami a hodnotu reflexního koeficientu  $1 \cdot 10^{-6}$ . V každé transversální rovině se nachází 500 výpočetních bodů při šířce waferu 500  $\mu\text{m}$  tak připadá jeden bod na jeden  $\mu\text{m}$ .

Byla provedena simulace pomocí skriptu, který se vytvoří pomocí tlačítka „*Scattering Data Script*“ v rozsahu vlnových délek 1000-1700 nm s krokem 10 nm výsledná data byla exportována do komponenty v OptiSystemu a odměřeny její parametry v závislosti na vlnové délce. Výsledek simulace pro vlnovou délku 1370 nm je uveden na obr. 27.



Obr. 26: Průběh indexu lomu navrženého OVČ.



Obr. 27: Intenzita elektromagnetického pole PLC OVČ při 1350 nm.

## 4.9 Měření navržené komponenty

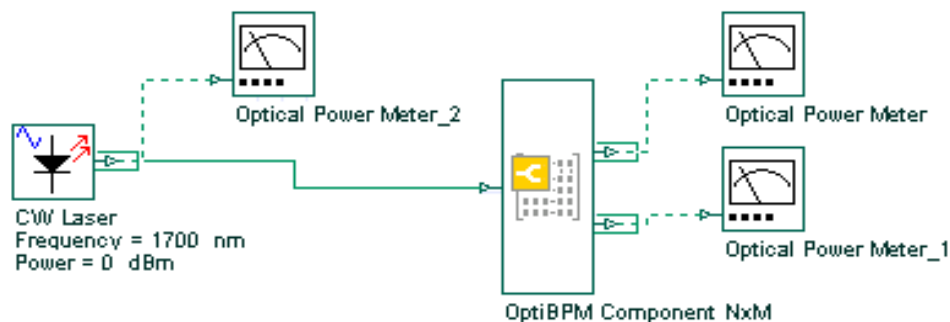
Pro odměření parametrů vytvořené komponenty použijeme jednoduché zapojení složené ze zdroje konstantního optického výkonu, měřené komponenty OptiBPM Component NxM s vloženým datovým souborem „\*.s“ a měřiči výkonu. Jelikož v OptiSystemu používáme k propojení měřících prvků a měřeného prvku ideální optická vlákna a na měřený OVČ nepůsobí žádné rušivé vlivy z okolí, není přesnost měření ovlivněna. Měříme tedy skutečný výkon na vstupu a výstupu OVČ. Schéma zapojení je uvedeno na obr. 28. Jelikož i OptiSystem podporuje VBScript bylo jeho funkcí využito pro urychlení měření a spouštění simulace:

```

Dim Lm
Set Lm = Document.GetLayoutMgr
Dim Layout1
Set Layout1 = Lm.GetCurrentLayout
Dim Canvas1
Set Canvas1 = Layout1.GetCurrentCanvas
Dim comp
Set comp = Canvas1.GetComponentByName("CW Laser")
For x=0 to 35
    comp.SetParameterValue "Frequency", 1000+20*x
    Document.CalculateProject False, False
    MsgBox(1000+20*x)
Next

```

Na zdroji optického výkonu byla nastavena výkonová úroveň 0 dBm tedy 1 mW. Měřiče optického výkonu zobrazují jak hodnotu výkonu ve watttech tak výkonovou úroveň v dBm. Hodnota útlumu je rovna rozdílu vstupní a výstupní úrovně výkonu. Jelikož je úroveň vstupního výkonu 0 dBm je zobrazovaná úroveň výkonu na měřiči výkonu rovna vloženému útlumu. Měření probíhalo s krokem 20 nm [15].



Obr. 28: Schéma zapojení měřené komponenty v OptiSystemu.

Z naměřených hodnot výkonů a vložených útlumů v závislosti na vlnové délce, které zobrazuje tabulka 17 a tabulka 18, byly vypočteny hodnoty dělicího poměru a zbytkového útlumu. Vypočtené hodnoty uvádí tabulka 19 a tabulka 20. Průběh vloženého útlumu je zobrazen na obr. 29 a obr. 30. Dělicí poměr a zbytkový útlum jsou na obr. 31 a obr. 32.

Tab. 17: Naměřené hodnoty výkonů na výstupech.

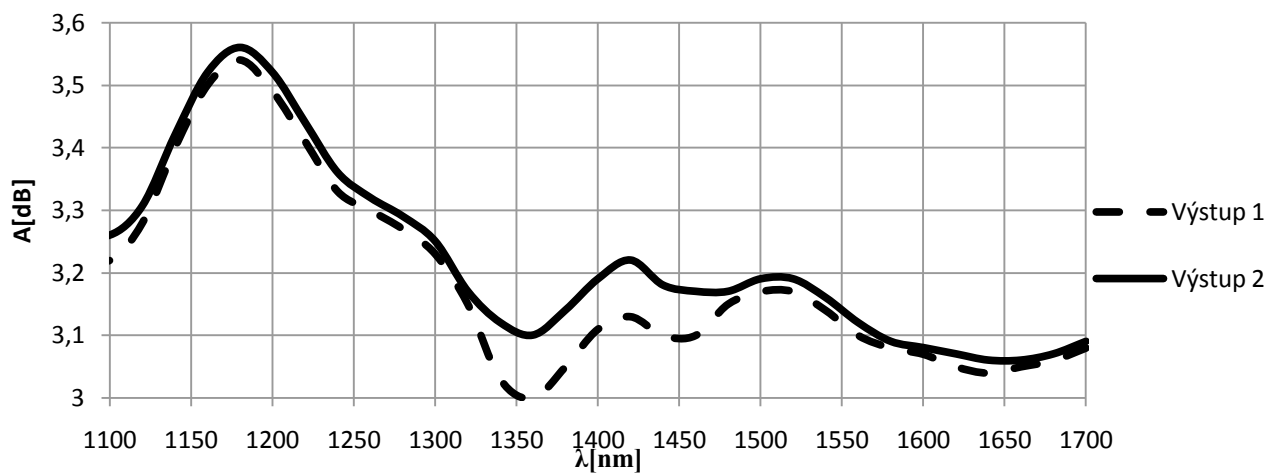
$\lambda$ [nm]	1000	1020	1040	1060	1080	1100	1120	1140	1160	1180
Výstup 1 [mW]	0,004	0,098	0	0,470	0,474	0,476	0,470	0,457	0,447	0,443
Výstup 2 [mW]	0,914	0,000	0	0,466	0,471	0,472	0,467	0,455	0,445	0,441
$\lambda$ [nm]	1200	1220	1240	1260	1280	1300	1320	1340	1360	1380
Výstup 1 [mW]	0,448	0,456	0,465	0,468	0,471	0,475	0,484	0,498	0,501	0,495
Výstup 2 [mW]	0,445	0,453	0,461	0,466	0,469	0,473	0,482	0,488	0,490	0,485
$\lambda$ [nm]	1400	1420	1440	1460	1480	1500	1520	1540	1560	1580
Výstup 1 [mW]	0,489	0,486	0,490	0,490	0,484	0,482	0,482	0,485	0,490	0,492
Výstup 2 [mW]	0,480	0,476	0,481	0,482	0,482	0,480	0,480	0,483	0,488	0,491
$\lambda$ [nm]	1600	1620	1640	1660	1680	1700				
Výstup 1 [mW]	0,493	0,495	0,497	0,495	0,494	0,492				
Výstup 2 [mW]	0,492	0,493	0,494	0,494	0,493	0,491				

Tab. 18: Naměřené hodnoty vložného útlumu.

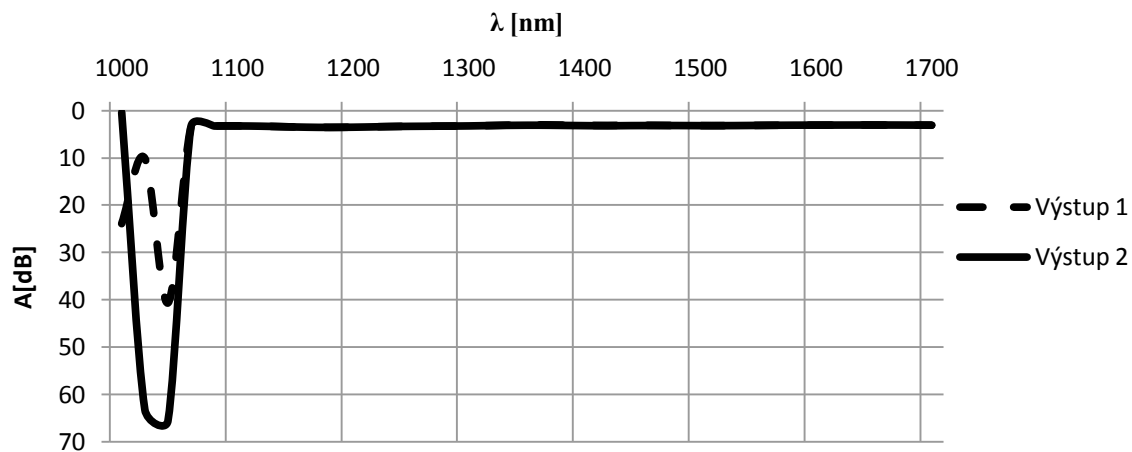
$\lambda$ [nm]	1000	1020	1040	1060	1080	1100	1120	1140	1160	1180
Výstup 1 [dB]	23,9	10,08	40,66	3,28	3,24	3,22	3,28	3,4	3,5	3,54
Výstup 2 [dB]	0,39	63,14	65,53	3,32	3,27	3,26	3,307	3,42	3,52	3,56
$\lambda$ [nm]	1200	1220	1240	1260	1280	1300	1320	1340	1360	1380
Výstup 1 [dB]	3,49	3,41	3,33	3,3	3,27	3,23	3,15	3,03	3	3,05
Výstup 2 [dB]	3,52	3,44	3,36	3,32	3,29	3,25	3,17	3,12	3,1	3,14
$\lambda$ [nm]	1400	1420	1440	1460	1480	1500	1520	1540	1560	1580
Výstup 1 [dB]	3,11	3,13	3,1	3,1	3,15	3,17	3,17	3,14	3,1	3,08
Výstup 2 [dB]	3,19	3,22	3,18	3,17	3,17	3,19	3,19	3,16	3,12	3,09
$\lambda$ [nm]	1600	1620	1640	1660	1680	1700				
Výstup 1 [dB]	3,07	3,05	3,04	3,05	3,06	3,08				
Výstup 2 [dB]	3,08	3,07	3,06	3,06	3,07	3,09				

Tab. 19: Vypočtené hodnoty dělicího poměru.

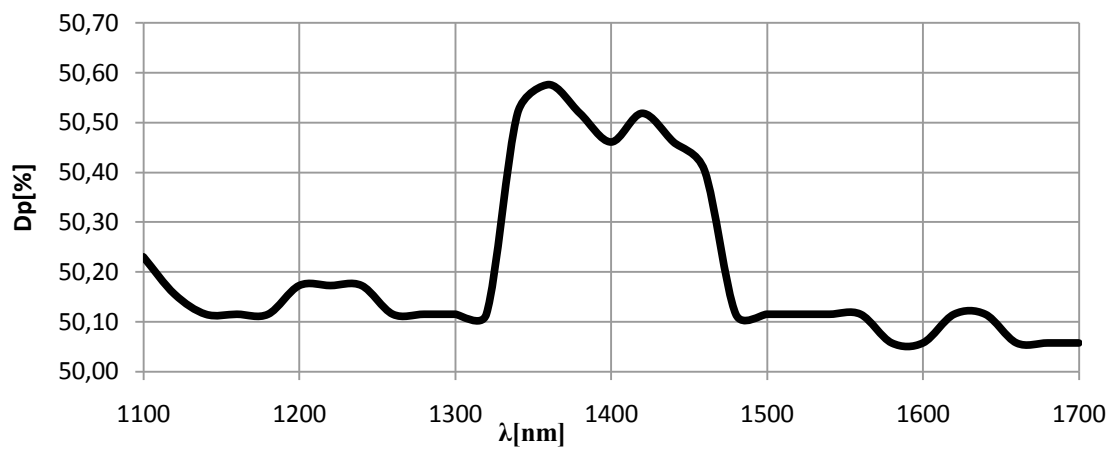
$\lambda$ [nm]	1000	1020	1040	1060	1080	1100	1120	1140	1160	1180
Dp [%]	0,44	100,00	99,68	50,23	50,17	50,23	50,16	50,12	50,12	50,12
$\lambda$ [nm]	1200	1220	1240	1260	1280	1300	1320	1340	1360	1380
Dp [%]	50,17	50,17	50,17	50,12	50,12	50,12	50,12	50,52	50,58	50,52
$\lambda$ [nm]	1400	1420	1440	1460	1480	1500	1520	1540	1560	1580
Dp [%]	50,46	50,52	50,46	50,40	50,12	50,12	50,12	50,12	50,12	50,06
$\lambda$ [nm]	1600	1620	1640	1660	1680	1700				
Dp [%]	50,06	50,12	50,12	50,06	50,06	50,06				



Obr. 29: Graf závislosti vložného útlumu na vlnové délce 1100-1700 nm.



Obr. 30: Graf závislosti vložného útlumu na vlnové délce 1000-1700 nm.

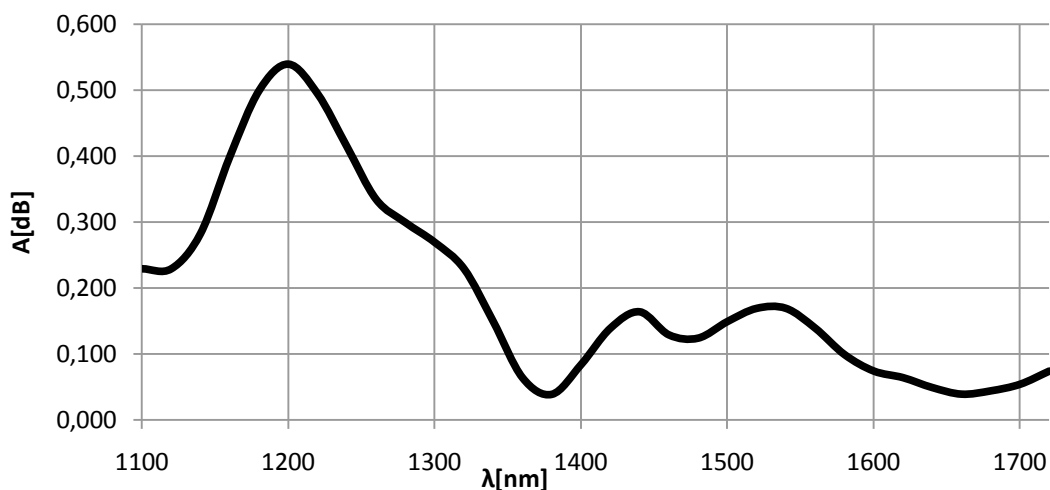


Obr. 31: Graf závislosti dělicího poměru na vlnové délce 1100-1700 nm.



Tab. 20: Vypočtené hodnoty zbytkového útlumu.

$\lambda$ [nm]	1000	1020	1040	1060	1080	1100	1120	1140	1160	1180
A [dB]	0,371	10,080	40,646	0,290	0,245	0,230	0,283	0,400	0,500	0,540
$\lambda$ [nm]	1200	1220	1240	1260	1280	1300	1320	1340	1360	1380
A [dB]	0,495	0,415	0,335	0,300	0,270	0,230	0,150	0,064	0,039	0,084
$\lambda$ [nm]	1400	1420	1440	1460	1480	1500	1520	1540	1560	1580
A [dB]	0,140	0,164	0,130	0,125	0,150	0,170	0,170	0,140	0,100	0,075
$\lambda$ [nm]	1600	1620	1640	1660	1680	1700				
A [dB]	0,065	0,050	0,040	0,045	0,055	0,075				



Obr. 32: Graf závislosti zbytkového útlumu na vlnové délce 1100-1700 nm.

Z důvodu velmi velké změny vložného útlumu v rozmezí měřených vlnových délek 1000-1100 nm byl pro přehlednost průběh vložného útlumu zobrazen při rozsahu 1100-1700 nm obr. 29 a 1000-1700 nm obr. 31. Hranici 1100 nm pak lze označit jako dolní mez pracovních vlnových délek navrženého OVČ.

V průběhu grafu vložného útlumu obr. 29 se nachází přibližně na hodnotě vlnové délky 1175 nm výrazná změna útlumu. I přes tuto špičku si navržený OVČ stále zachovává parametry srovnatelné s v současné době vyráběnými OVČ. Z obr. 29 a hodnot, které uvádí tabulka 18 lze také určit maximální hodnotu uniformity 0,1 dB při 1360 nm v rozsahu pracovních vlnových délek 1100-1700 nm.

## 5. VÝHODY A MOŽNÉ PROBLÉMY IMPLEMENTACE

### 5.1 Výhody simulačního softwaru

Software určený pro modelování a simulování na počítači se stal základním nástrojem k tomu, abychom dokázali určit, jak se bude navrhovaná komponenta chovat, ať už se jedná o optickou síť či jen o její komponentu. Modelovací a simulační software většinou v sobě zahrnuje komponenty existující v době jeho vzniku, což patří k jedné z největších výhod. Díky simulačním softwarům je možné modelovat ještě neexistující výrobek, případně vybrat nejvhodnější variantu návrhu výrobku určeného k sériové výrobě. Provedené simulace nejsou ovlivněny rušivými vlivy okolí. Dále je také možné optimalizovat výrobu a hledat řešení problémů, které se vyskytují u stávající výroby. Další způsob využití simulačního softwaru je možnost zabývat i rozvahami nad změnami vybraných parametrů návrhu simulace – simulace typu „Co se stane když ...?“ - a sledovat tak reakce na tyto změny, přičemž náklady jsou zanedbatelné. Výhodou počítačového zpracování je také možnost jednotlivé kroky návrhu zefektivnit, zrychlit a v neposlední řadě také snížit jejich finanční nároky, což přináší výhodu v rychlejší reakci na požadavky, rychlejší inovaci a tedy i rychlému zhodnocení investice do simulačního softwaru.

*„Je prokázáno, že jedna vložená koruna do simulace přinese, resp. ušetří až dvanáct korun při výrobě.“*

*Martin Skupil (2006)*

Jelikož vlastnosti OVČ závisí na mnoha různých parametrech, jejichž přesnost se s ohledem na konečnou cenu výsledného produktu pohybuje v dané toleranci, musíme navrhovat OVČ tak, aby i při změně některé z těchto hodnot bylo dosaženo deklarovaných parametrů. Díky velkému výpočetnímu výkonu současných počítačů a výpočetních algoritmů simulačních nástrojů jsme schopni v krátkém čase provést simulace zahrnující změny všech těchto parametrů a následně analyzovat jejich konečný vliv na samotnou funkci OVČ. Z výsledku těchto simulací jsme pak schopni určit hodnoty parametrů a stanovit jejich tolerance.

### 5.2 Nevýhody simulačního softwaru

Nejzávažnějším kritériem při rozhodování, zda nasadit simulační nástroje do výrobního procesu, je především pořizovací cena a dále pak náklady spojené s údržbou simulačních nástrojů. Cena špičkových simulačních aplikací se pohybuje v řádech milionů korun. Tyto částky mohou být pro řadu firem příliš vysoké a z tohoto důvodu si pořízení takového nástroje mohou rozmyslet, případně

finanční částku investovat jinde ve výrobě. Pořízení simulačního softwaru se neprojeví okamžitě po jeho zakoupení na zlepšení výroby, ale až s odstupem času, kdy dojde zcela k jeho začlenění do výrobního procesu či vývoje.

Věrohodnost výstupů simulací závisí na kvalitě simulačního softwaru, jehož tvorba není triviální a není tak možné vyloučit výpočetní chybu samotné aplikace. Případně se může použít nevhodný simulační algoritmus pro řešení problému a výsledky simulace jsou pak rovněž nesprávné. Například metoda BPM je vhodná pro řešení simulací návrhu kterým prochází světlo podél osy Z.

Další bariérou může také být neznalost a nezkušenost zaměstnanců s vybraným simulačním nástrojem, což může způsobit, že ve výsledku bude návrh součástky trvat mnohem déle. Rovněž nesprávná interpretace výsledků simulací může znehodnotit celý proces návrhu. Řešením tohoto problému je provádění nejrozumnějších školení a kursů, které vyžadují další financování a také čas. Některé prováděné simulace mohou být časově náročné, uživatel se může snažit zkrátit dobu simulace, což může rovněž vést k nesprávným výsledkům.

## 6. ZÁVĚR

V této diplomové práci byly popsány dvě nejrozšířenější technologie výroby optických vazebních článků – FBT a PLC. Matematický popis funkce OVČ vysvětluje nejen základní principy, ale také to, jaké mají dopady změny jednotlivých parametrů na výsledek. Tyto teoretické poznatky byly ověřeny simulacemi v prostředí OptiBPM. Podle parametrů, které dosahují jednotlivé technologie, lze usuzovat, že se bude stále více rozšiřovat technologie PLC a technologie FBT bude ustupovat do pozadí.

Měřením OVČ se jasně ukázala nutnost použití přesných a kalibrovaných měřicích přístrojů a zdrojů. Použitím špičkových přístrojů firmy EXFO bylo dosaženo dostatečně přesného měření, které vždy potvrdilo správnost parametrů, které udávají výrobci v katalogových listech měřených OVČ. V případě méně přesných měřicích přístrojů od firmy NOYES již naměřené hodnoty nebyly tak příznivé. Výkony přeslechu na blízkém konci změřené pomocí detektoru EXFO jsou přibližně o řád nižší než u měření prováděných detektorem NOYES, což dává rozdíl měřených hodnot 10dB. Nejdůležitějším přístrojem pro správné měření se ukázal zdroj optického signálu, na jehož stabilitě závisela výsledná přesnost měření. Při měření velmi malých výkonů, jako je například měření útlumu přeslechu, se ukázalo, že přesnost detektoru hraje velmi důležitou roli. Nepřesnosti měření u detektorů NOYES je možné přisoudit velkému tepelnému šumu a temnému proudu z důvodu použité germaniové fotodiody a dále také vlivu stárnutí, jelikož detektor je používán již 3 roky.

Dále je tato diplomová práce zaměřena především na návrh OVČ v programovém prostředí Optiwave OptiBPM 10. Popisuje nejdůležitější části této aplikace tak, aby byl uživatel v prostředí OptiBPM schopen navrhnout a nasimulovat požadovaný OVČ. Jelikož je tento simulační a návrhový software velmi rozsáhlý, zaměřuje se tato práce jen na nejdůležitější části, které je nutné znát pro návrh pasivního OVČ. Z tohoto důvodu nejsou popsány části zaměřené na vliv elektrického pole elektrod umístěných do waferu. Zde se tedy naskytá možnost dalšího rozšiřování zde uvedených poznatků při práci s OptiBPM. Vlivem externího elektrického pole z elektrod je možno v budoucnu studovat elektrooptický jev v prostředí OptiBPM a provádět nejrůznější simulace spojené s aktivními optickými prvky, jako je například Mach-Zehnderův elektrooptický modulátor.

První navržený FBT OVČ potvrzuje všechna očekávaná chování popsaná teoreticky. Návrh tohoto OVČ ovšem nelze v praxi využít vzhledem k velké závislosti dělicího poměru na vlnové délce, která se projevila při simulacích. Druhý navržený PLC OVČ má výsledné parametry nesrovnatelně lepší, jeho rozsah pracovních vlnových délek 1100-1700nm lze srovnávat s OVČ vyráběnými v současné

době. To samé lze říci i o hodnotách vloženého útlumu OVČ. Hodnota uniformity potvrzuje schopnost navrženého OVČ zachovat rovnoměrné rozložení výkonu na výstupech. Naměřená hodnota uniformity 0,1 dB ukazuje, že v tomto ohledu je navržený OVČ lepší než v současnosti dostupné OVČ.

Jelikož OptiSystem nedovoluje připojit zdroj optického signálu na port komponenty *NxM OptiBPM Component*, který je označený jako výstup, a ani měřič optického výkonu na port označený jako vstup, nejsme schopni provést měření z obou stran navrženého OVČ. Ze stejného důvodu nelze měřit ani přeslechy.

Je nutné podotknout, že měření bylo prováděno na počítačovém modelu. Skutečné hodnoty OVČ vyrobeného podle uvedeného návrhu se mohou lišit z důvodu nečistot v materiálu nebo z důvodu nedodržení geometrické přesnosti použité výrobní technologie. Také indexy lomu substrátu a difundované oblasti se liší od požadovaných hodnot, což je způsobeno použitím jiných materiálů. To je způsobeno tím, že nebyly známy technologické postupy výroby, výchozí materiály a tedy ani jejich elektrooptické koeficienty, které je nutné zadat do nastavení profilu návrhu v Profile designeru.

V závěrečné fázi tvorby této diplomové práce uvolnila společnost Optiwave novou verzi OptiBPM 11, která nabízí mnoho nových funkcí a vylepšení. Především došlo k vylepšení podpory a zjednodušení návrhu simulace s postupně se měnícími parametry návrhu. Dále došlo k vylepšení aplikace OptiMODE, která slouží k řešení parametrů módů procházející profilem návrhu.

Poslední kapitola pojednává o možných výhodách a nevýhodách implementace simulačního softwaru OptiBPM do výroby. Po vyhodnocení uvedených argumentů lze říci, že využití simulace je vždy přínosem podaří-li se překlenout největší počáteční problémy skrývající se ve vysoké pořizovací ceně a neznalosti personálu. Je však nutné si uvědomit, že simulace nenahrazuje plnohodnotné měření na fyzické součástce. Simulační software však lze použít jako silný nástroj, který usnadní a zrychlí vývoj aktivních či pasivních optoelektronických prvků.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. **Ghatak, Ajoy and Thyagarajan, K.** *Introduction to fiber optics*. s.l. : Cambridge University Press, 1998. 0521577853.
2. **Huang, Yong a Yu, Yang.** Fused Fiber Products Without a Fused Biconical Taper. [Online] Comcore Optical Technologies, Inc,. <http://ttc.web.cern.ch/TTC/TTCoc/OFC2002.pdf>.
3. *Reproducible Method for Fabricating Fused Biconical Tapered Couplers Using a CO2 Laser Based Process.* **C. McAtamney, A. Cronin, R. Sherlock, G. M. O'Connor, T. J. Glynn.** Mnichov : National Centre for Laser Applications, National University of Ireland, 2005. [http://www.ncla.ie/publications/LIM\\_Colm.PDF](http://www.ncla.ie/publications/LIM_Colm.PDF).
4. Integrated publishing. *Fiber optic couplers*. [Online] [Citace: 17. březen 2011.] <http://www.tpub.com/neets/tm/108-11.htm>.
5. **Burian, Zdeněk.** Technologie optických vlnovodů na křemíkovém substrátu. *Návrh fotonických součástek a obvodů*. [Online] 20. 11 2007. [Citace: 30. 3 2011.] [www.micro.feld.cvut.cz/home/X34NFS/aktuality/CCC1.do](http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34NFS/aktuality/CCC1.do).
6. **Takahashi, Hiroshi.** *Planar lightwave circuit devices for optical communication*. [Online] 2003. [Citace: 30. 3 2011.] <http://lib.semi.ac.cn:8080/tsh/dzzy/wsqr/SPIE/vol5246/5246-520.pdf>.
7. **Agilent Technologies.** Polarization Dependent Loss Measurement of Passive Optical Components. [Online] 14. 3 2002. [Citace: 23. 2 2011.] [cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5988-1232EN.pdf](http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5988-1232EN.pdf). 5988-1232EN.
8. **Katedra telekomunikační techniky.** Měření na optických vazebních člancích (OVČ). *Katedra telekomunikační techniky*. [Online] [Citace: 15. 1 2011.] [www.comtel.cz/files/download.php?id=3190](http://www.comtel.cz/files/download.php?id=3190).
9. **Optokon.** SFT 01x02 Singlemode Couplers. [Online] 23. 4 2007. [Citace: 25. 3 2011.] [http://optokon.cz/datasheets/A-Passive\\_fiber\\_optic\\_components/A5-Couplers,Splitters/CPL\\_06-02\\_EN-SFT-S35-01x02.pdf](http://optokon.cz/datasheets/A-Passive_fiber_optic_components/A5-Couplers,Splitters/CPL_06-02_EN-SFT-S35-01x02.pdf).
10. —. Wavelength Division Multiplexers. [Online] 7. 10 2008. [Citace: 21. 3 2011.] [http://optokon.cz/datasheets/A-Passive\\_fiber\\_optic\\_components/A6-Wavelength\\_division\\_multiplexers/A61-WDM/EN/CPL\\_03-02\\_EN-SFW.pdf](http://optokon.cz/datasheets/A-Passive_fiber_optic_components/A6-Wavelength_division_multiplexers/A61-WDM/EN/CPL_03-02_EN-SFW.pdf).
11. **Optiwave.** *OptiBPM User's Reference*. Ottawa : Optiwave, 2009.
12. —. *OptiBPM Technical Background and Tutorials*. Ottawa : Optiwave, 2009.

13. —. *OptiBPM Visual Basic Reference Guide*. Ottawa : Optiwave, 2009.
14. —. *OptiSystem Component Library*. Ottawa : Optiwave, 2010.
15. —. *OptiSystem Visual Basic Reference*. Ottawa : Optiwave, 2010.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Grafy průběhů funkcí $\sin^2(x)$ a $\cos^2(x)$ .....	4
Obr. 2: Graf průběhu funkcí výkonu při $\beta_1 \neq \beta_2$ .....	5
Obr. 3: Grafy průběhu výkonu $P_{1z}$ při změně $\Delta\beta$ .....	5
Obr. 4: Technologie FBT [4].....	8
Obr. 5: Výroba vlnovodů technologií PLC. ....	10
Obr. 6: Vlnovody PLC OVČ 01x04.....	10
Obr. 7: Přehledové schéma OVČ 02x02. ....	12
Obr. 8: Schéma zapojení pro měření zbytkového a vložného útlumu.....	16
Obr. 9: Schéma zapojení pro měření zbytkového a vložného útlumu ze strany výstupů.....	16
Obr. 10: Pouzdro měřeného OVČ Optokon 70/30.....	16
Obr. 11: Vnitřní uspořádání OVČ Optokon 70/30.....	16
Obr. 12: Detail výstupu OVČ Optokon 70/30. ....	16
Obr. 13: Grafické znázornění waferu.....	30
Obr. 14: Wafer a počátek souřadnicového systému.....	30
Obr. 15: Souřadnice hloubky vlnovodu[11]. ....	33
Obr. 16: Náhled OVČ v 3D WG Vieweru. ....	43
Obr. 17: Graf závislosti vazebního koeficientu na vzdálenosti os vláken. ....	44
Obr. 18: Graf závislosti vazebního koeficientu na poloměru jádra vláken. ....	44
Obr. 19: Graf závislosti intenzity elektromagnetického pole na vzdálenosti vláken. ....	46
Obr. 20: Graf závislosti intenzity elektromagnetického pole na poloměru jader vláken. ....	47
Obr. 21: Graf závislosti intenzity elektromagnetického pole na prodlužování vazební oblasti.....	48
Obr. 22: Graf závislosti vazebního koeficientu na vlnové délce. ....	49
Obr. 23: Graf závislosti intenzity elektromagnetického pole na vlnové délce. ....	50
Obr. 24: Zadání požadovaného tvaru OVČ.....	51



Obr. 25: Navržený OVČ v aplikaci OptiBPM.....	51
Obr. 26: Průběh indexu lomu navrženého OVČ.....	53
Obr. 27: Intenzita elektromagnetického pole PLC OVČ při 1350 nm. ....	53
Obr. 28: Schéma zapojení měřené komponenty v OptiSystemu. ....	54
Obr. 29: Graf závislosti vložného útlumu na vlnové délce 1100-1700 nm. ....	56
Obr. 30: Graf závislosti vložného útlumu na vlnové délce 1000-1700 nm. ....	56
Obr. 31: Graf závislosti dělicího poměru na vlnové délce 1100-1700 nm. ....	56
Obr. 32: Graf závislosti zbytkového útlumu na vlnové délce 1100-1700 nm. ....	57

## SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Útlum výstupů podle hodnoty dělicího poměru.</i>	14
<i>Tab. 2: Uspořádání naměřených hodnot na výstupech OVČ.</i>	15
<i>Tab. 3: Měření OVČ 90/10 při <math>\lambda=1310</math> nm.</i>	17
<i>Tab. 4: Měření OVČ 90/10 při <math>\lambda=1490</math> nm.</i>	17
<i>Tab. 5: Měření OVČ 90/10 při <math>\lambda=1550</math> nm.</i>	17
<i>Tab. 6: Tabulka vypočtených parametrů OVČ 90/10 při <math>\lambda=1310, 1490, 1550</math> nm.</i>	18
<i>Tab. 7: Měření OVČ 70/30 při <math>\lambda=1310</math> nm.</i>	18
<i>Tab. 8: Měření OVČ 70/30 při <math>\lambda=1550</math> nm.</i>	19
<i>Tab. 9: Tabulka vypočtených parametrů OVČ 70/30 při <math>\lambda=1310, 1550</math> nm.</i>	19
<i>Tab. 10: Měření OVČ 50/50 při <math>\lambda=1310</math> nm.</i>	20
<i>Tab. 11: Měření OVČ 50/50 při <math>\lambda=1490</math> nm.</i>	20
<i>Tab. 12: Měření OVČ 50/50 při <math>\lambda=1550</math> nm.</i>	20
<i>Tab. 13: Tabulka vypočtených parametrů OVČ 50/50 při <math>\lambda=1310, 1490, 1550</math> nm.</i>	21
<i>Tab. 14: Měření WDM OVČ 1310/1550 při <math>\lambda=1310</math> nm.</i>	21
<i>Tab. 15: Měření WDM OVČ 1310/1550 při <math>\lambda=1550</math> nm.</i>	22
<i>Tab. 16: Tabulka vypočtených parametrů WDM OVČ při <math>\lambda=1310, 1550</math> nm.</i>	22
<i>Tab. 17: Naměřené hodnoty výkonů na výstupech.</i>	55
<i>Tab. 18: Naměřené hodnoty vložného útlumu.</i>	55
<i>Tab. 19: Vypočtené hodnoty dělicího poměru.</i>	55
<i>Tab. 20: Vypočtené hodnoty zbytkového útlumu.</i>	57

## SEZNAM PŘÍLOH

<b>PŘÍLOHA – VYTVOŘENÉ SKRIPTY .....</b>	<b>1</b>
Vytvořené skripty část 1 .....	1
Vytvořené skripty část 2 .....	3
Vytvořené skripty část 3 .....	4

# PŘÍLOHA – VYTVOŘENÉ SKRIPTY

Obsahem této přílohy jsou vytvořené skripty pro simulace reakce rozložení elektromagnetického pole na změny provedené v návrhu FBT OVČ. V části 1 je skript, který vytvoří a vloží do návrhu jednotlivé vlnovody tento skript, využívají všechny skripty v části 2. Skripty v části 2 provádějí jednotlivé změny v návrhu, který vytvoří skript z části 1. Skript v části 3 slouží pro simulaci reakce návrhu na změnu vlnové délky.

## Vytvořené skripty část 1

Skript pro sestavení návrhu layoutu:

```
WGMgr.DeleteAll
InputPlaneMgr.DeleteAll

Dim Linear1
Set Linear1 = WGMgr.CreateObj ( "WGLinear", "Linear1" )
Linear1.SetPosition 0, 7.5, 100, 7.5
Linear1.SetAttr "WidthExpr", "width"
Linear1.SetAttr "Depth", "0"
Linear1.SetAttr "StartThickness", "4.000000"
Linear1.SetAttr "EndThickness", "4.000000"
Linear1.SetProfileName "FiberPro1"
Linear1.SetDefaultThicknessTaperMode True

Dim SBendSin1
Set SBendSin1 = WGMgr.CreateObj ( "WGSBendArc", "SBendSin1" )
SBendSin1.SetAttr "AngleOffset", CDbl( 0.000000 )
SBendSin1.SetPosition 100, 7.5, 400, 3
SBendSin1.SetAttr "WidthExpr", "width"
SBendSin1.SetAttr "Depth", "0"
SBendSin1.SetAttr "StartThickness", "4.000000"
SBendSin1.SetAttr "EndThickness", "4.000000"
SBendSin1.SetProfileName "FiberPro1"
SBendSin1.SetDefaultThicknessTaperMode True

Dim Linear2
Set Linear2 = WGMgr.CreateObj ( "WGLinear", "Linear2" )
Linear2.SetPosition 400, 3, 600, 3
Linear2.SetAttr "WidthExpr", "width"
Linear2.SetAttr "Depth", "0"
Linear2.SetAttr "StartThickness", "4.000000"
Linear2.SetAttr "EndThickness", "4.000000"
Linear2.SetProfileName "FiberPro1"
Linear2.SetDefaultThicknessTaperMode True
```

```

Dim SBendSin2
Set SBendSin2 = WGMgr.CreateObj ( "WGSBendArc", "SBendSin2" )
SBendSin2.SetAttr "AngleOffset", CDBl( 0.000000 )
SBendSin2.SetPosition 600, 3, 900, 7.5
SBendSin2.SetAttr "WidthExpr", "width"
SBendSin2.SetAttr "Depth", "0"
SBendSin2.SetAttr "StartThickness", "4.000000"
SBendSin2.SetAttr "EndThickness", "4.000000"
SBendSin2.SetProfileName "FiberPro1"
SBendSin2.SetDefaultThicknessTaperMode True

```

```

Dim Linear3
Set Linear3 = WGMgr.CreateObj ( "WGLinear", "Linear3" )
Linear3.SetPosition 900, 7.5, 1000, 7.5
Linear3.SetAttr "WidthExpr", "width"
Linear3.SetAttr "Depth", "0"
Linear3.SetAttr "StartThickness", "4.000000"
Linear3.SetAttr "EndThickness", "4.000000"
Linear3.SetProfileName "FiberPro1"
Linear3.SetDefaultThicknessTaperMode True

```

```

Dim Linear4
Set Linear4 = WGMgr.CreateObj ( "WGLinear", "Linear4" )
Linear4.SetPosition 0, -7.5, 100, -7.5
Linear4.SetAttr "WidthExpr", "width"
Linear4.SetAttr "Depth", "0"
Linear4.SetAttr "StartThickness", "4.000000"
Linear4.SetAttr "EndThickness", "4.000000"
Linear4.SetProfileName "FiberPro1"
Linear4.SetDefaultThicknessTaperMode True

```

```

Dim SBendSin3
Set SBendSin3 = WGMgr.CreateObj ( "WGSBendArc", "SBendSin3" )
SBendSin3.SetAttr "AngleOffset", CDBl( 0.000000 )
SBendSin3.SetPosition 100, -7.5, 400, -3
SBendSin3.SetAttr "WidthExpr", "width"
SBendSin3.SetAttr "Depth", "0"
SBendSin3.SetAttr "StartThickness", "4.000000"
SBendSin3.SetAttr "EndThickness", "4.000000"
SBendSin3.SetProfileName "FiberPro1"
SBendSin3.SetDefaultThicknessTaperMode True

```

```

Dim Linear5
Set Linear5 = WGMgr.CreateObj ( "WGLinear", "Linear5" )
Linear5.SetPosition 400, -3, 600, -3
Linear5.SetAttr "WidthExpr", "width"
Linear5.SetAttr "Depth", "0"
Linear5.SetAttr "StartThickness", "4.000000"
Linear5.SetAttr "EndThickness", "4.000000"
Linear5.SetProfileName "FiberPro1"
Linear5.SetDefaultThicknessTaperMode True

```

```

Dim SBendSin4
Set SBendSin4 = WGMgr.CreateObj ( "WGSBendArc", "SBendSin4" )
SBendSin4.SetAttr "AngleOffset", CDbl( 0.000000 )
SBendSin4.SetPosition 600, -3, 900, -7.5
SBendSin4.SetAttr "WidthExpr", "width"
SBendSin4.SetAttr "Depth", "0"
SBendSin4.SetAttr "StartThickness", "4.000000"
SBendSin4.SetAttr "EndThickness", "4.000000"
SBendSin4.SetProfileName "FiberPro1"
SBendSin4.SetDefaultThicknessTaperMode True

Dim Linear6
Set Linear6 = WGMgr.CreateObj ( "WGLinear", "Linear6" )
Linear6.SetPosition 900, -7.5, 1000, -7.5
Linear6.SetAttr "WidthExpr", "width"
Linear6.SetAttr "Depth", "0"
Linear6.SetAttr "StartThickness", "4.000000"
Linear6.SetAttr "EndThickness", "4.000000"
Linear6.SetProfileName "FiberPro1"
Linear6.SetDefaultThicknessTaperMode True

Dim InputPlane1
Set InputPlane1 = InputPlaneMgr.CreateObj ( "Mode", "InputPlane1" )
InputPlane1.SetZPosition 10
InputPlane1.SetReferenceIndexWaveguide2D "Linear1"
InputPlane1.SetReferenceIndexWaveguide3D "Linear1"
Set InputField2D = InputPlane1.CreateInputField ( "2D", "Mode", "InputField2D" )
InputField2D.SetWaveguideID "Linear1"
InputField2D.SetAmplitude "1.0"
InputField2D.SetPhase "0.0"
InputField2D.SetTiltAngleType "Auto"
InputField2D.SetTiltIndexType "Modal"
Set InputField3D = InputPlane1.CreateInputField ( "3D", "Mode", "InputField3D" )
InputField3D.SetWaveguideID "Linear1"
InputField3D.SetAmplitude "1.0"
InputField3D.SetPhase "0.0"
InputField3D.SetTiltAngleType "Auto"
InputField3D.SetTiltIndexType "Modal"
InputPlane1.SetEnabled TRUE

```

## Vytvořené skripty část 2

Skript pro změnu šířky jádra vlákna:

```

for x=4 to 10 step 0.2
    ParamMgr.SetParam "width", x
    ParamMgr.Simulate
    WGMgr.Sleep( 50 )
next

```

Skript pro rozšiřování vazební oblasti:

```
Dim posun
ParamMgr.SetParam "width", 4
For K= -50 to 7
    Posun=4*K
    Linear2.SetPosition 400+CStr(posun), 3, 600-CStr(posun), 3
    SBendSin1.SetPosition 100, 7.5, 400+CStr(posun), 3
    SBendSin2.SetPosition 600-CStr(posun), 3, 900, 7.5
    Linear5.SetPosition 400+CStr(posun), -3, 600-CStr(posun), -3
    SBendSin3.SetPosition 100, -7.5, 400+CStr(posun), -3
    SBendSin4.SetPosition 600-CStr(posun), -3, 900, -7.5
    WGMgr.Sleep( 50)
    ParamMgr.Simulate
Next
```

Skript pro vzdalování jader vlákna:

```
ParamMgr.SetParam "width", 4
Dim posun
Dim x
x=0
For K= 0 to 75
    Posun=0.1*K
    pozice=x - posun
    Linear5.SetPosition 400, CStr(pozice), 600, CStr(pozice)
    Linear2.SetPosition 400, -1*CStr(pozice), 600, -1*CStr(pozice)
    SBendSin3.SetPosition 600, CStr(pozice), 900, -7.5
    SBendSin4.SetPosition 100, -7.5, 400, CStr(pozice)
    SBendSin1.SetPosition 100, 7.5, 400, -1*CStr(pozice)
    SBendSin2.SetPosition 600, -1*CStr(pozice), 900, 7.5,
    WGMgr.Sleep( 100)
    ParamMgr.Simulate
Next
```

## Vytvořené skripty část 3

Skript pro změnu vlnové délky:

```
Dim InputPlane
Set InputPlane = InputPlaneMgr.GetObjFromID("InputPlane1")
InputPlane.DeleteAllFields
InputPlane.SetStartingFieldTypeStr "Mode"
InputPlane.SetEnabled TRUE
Dim InputField2D
Set InputField2D = InputPlane.CreateInputField ( "2D" , "Mode" , "InputField2D" )
InputField2D.SetAmplitude "1.0"
InputField2D.SetTiltAngleType "Auto"
InputField2D.SetTiltIndexType "Modal"
```

```

Dim InputField3D
Set InputField3D = InputPlane.CreateInputField ( "3D" , "Mode" , "InputField3D" )
InputField3D.SetAmplitude "1.0"
InputField3D.SetTiltAngleType "Auto"
InputField3D.SetTiltIndexType "Modal"

Dim WavelengthInitial
Dim WavelengthFinal
Dim NumberOfWavelengths
Dim DeltaWavelength
Dim NumberOfWaveGuides

WavelengthInitial = 1.20000000e+000
WavelengthFinal = 2.10000000e+000
NumberOfWavelengths = 91
If NumberOfWavelengths > 1 Then
    DeltaWavelength = (WavelengthFinal - WavelengthInitial)/(NumberOfWavelengths - 1)
Else
    DeltaWavelength = 0
End If

For I = 0 to NumberOfWavelengths - 1
    Wavelength = WavelengthInitial + DeltaWavelength * I
    ParamMgr.SetParam "SMatrixWavelength", CStr(Wavelength)
    InputPlane.SetReferenceIndexWaveguide "Linear1"
    InputField2D.SetWaveguideID "Linear1"
    InputField3D.SetWaveguideID "Linear1"
    ParamMgr.Simulate
Next

```